

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Bakalářská práce

2013

Adam Šinčl

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Měření modulovaných signálů osciloskopem a  
spektrálním analyzátozem – laboratorní úloha

Modulated Signals Measurement with Oscilloscope  
and Spectrum Analyzer – Laboratory Exercise

2013

Adam Šinčl

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

## Zadání bakalářské práce

Student: **Adam Šincl**  
Studijní program: **B2649 Elektrotechnika**  
Studijní obor: **3901R039 Biomedicínský technik**  
Téma: **Měření modulovaných signálů osciloskopem a spektrálním analyzátozem  
– laboratorní úloha  
Modulated Signals Measurement with Oscilloscope and Spectrum  
Analyzer - Laboratory Exercise**

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s jednotlivými principy modulace a druhy odpovídajících modulátorů.
2. Návrh koncepce konfigurovatelného modulátoru a generátoru signálů pro výukové účely.
3. Návrh obvodového řešení modulátoru.
4. Návrh a realizace DPS pro navržený modulátor.
5. Oživení a testování realizovaného modulátoru.
6. Vytvoření úlohy s realizovaným modulátorem včetně návodu do cvičení pro výuku modulovaných signálů v předmětu Technika elektronických přístrojů.
7. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HRDINA, Zdeněk a František VEJRAŽKA. *Signály a soustavy*. Praha: ČVUT, 2001. 234s. ISBN 80-01-01726-5.
- [2] NEVŘIVA, Pavel. *Analýza signálů a soustav*. 1.vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2000. 671s. ISBN 80-7300-004-0.
- [3] LANÍŽEK, Robert. *Elektronika*. 1.vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1998. 479s. ISBN 80-86056-25-2.
- [4] ABEL, Martin. *Plošné spoje se SMD, návrh a konstrukce*. Pardubice: Nakladatelství Platan, 2000. 218 s. ISBN 80-902733-2-7.
- [5] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: Přístroje a metody*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2003. 337 s. ISBN 80-01-02731-7.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladimír Kašík, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
*vedoucí katedry*



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 6.5.2013



.....  
Podpis

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Vladimíru Kašíkovi Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

# Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem tří modulací pro laboratorní úlohu. A to modulací amplitudovou (AM), frekvenční (FM) a impulsní šířkovou (PWM). Je zde uvedena teorie modulací, matematické popisy, rozdíly mezi modulacemi a jejich výhody a nevýhody. Jsou zde také uvedena jednotlivá obvodová řešení spolu s jejich popisem. V teoretických kapitolách jsou uvedeny principy činností spolu s popisem možností využitelnosti v praxi. Taktéž je v teoretické části zaznamenána konkrétní činnost jednotlivých částí všech tří modulací, ladění a testování. V praktické části je popsán postup realizace modulátorů AM, FM, PWM. Popsáno je skutečné obvodové řešení, při kterém bylo zapotřebí použít nástroje pro návrh desek plošných spojů. Všechny vyrobené části práce byly doladovány a zkoušeny na nepájivém poli. Finální výrobek byl odzkoušen v laboratoři a byla prověřena jeho funkčnost. Spolu s tím byly naměřeny výsledky, na základě kterých byla vytvořena laboratorní úloha pro použití ve výuce. Závěrem jsou vyhodnoceny zaznamenané výsledky modulací pomocí přístrojů, spektrálního analyzátoru a osciloskopu.

# Klíčová slova

Amplitudová modulace, amplitudový modulátor, frekvenční modulace, frekvenční modulátor, impulsní šířková modulace, impulsně šířkový modulátor, nosný signál, modulační signál, modulovaný signál, frekvenční spektrum, impulsně šířkové spektrum, amplitudové spektrum.

# Abstract

This thesis deals with three drafts for laboratory excersise. There are amplitude, frequency and pulse width modulation. In this thesis, there are theorethical and mathematical analysis. There are also described some advantages, disadvantages and differencies between these modulations, including their electric circles. In the theoretical analysis, there are mentioned principales of modulations with their possibilities of using in practice. In this part, there are also described things connected with tuning and testing of these modulations. In pratical analysis, thereis described the proces of the development of AM, FM and PWM modulator. Thereis also menti-oned their solution in EAGLE software. All manufactured parts of this thesis were tuned and tested on solder field. All PCB was also tested to get some information about its corectness. Fromall these things, there was created the laboratory excersise for using in practical lessons. In the end of this thesis, there are evaluated all results.

# Keywords

Amplitude modulation, amplitude modulator, frequency modulation, frequency modulator, pulse width modulation, pulse width modulator, carrier signal, modulating signal, modulated signal, frequency spectrum, pulse width spectrum, amplitude spectrum.

## Seznam použitých symbolů a zkratek

<b>Zkratka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Význam zkratky</b>
AM		Amplitudová modulace
$B_{FM}$	Hz	Šířka frekvenčního spektra
BNC		Bajonetový koaxiální konektor
$B_V$	Hz	Šířka spektra
C	F	Kapacita
$C_{1-n}$		Kondenzátor
D		Střída
$D_{1-n}$		Dioda
$D_z$		Zenerova dioda
DPS		Deska plošného spoje
DV		Pásmo dlouhých vln
E	J	Energie
$f$	Hz	Frekvence
$f_c$	Hz	Nosná frekvence
$\Delta f$	Hz	Kmitočtový zdvih
$f_m$	Hz	Modulační frekvence
FM		Frekvenční modulace
$f_{MAX}$	Hz	Maximální frekvence
$f_{MIN}$	Hz	Minimální frekvence
$f_{LC}$	Hz	Frekvence rezonančního obvodu
$f_{VZ}$	Hz	Vzorkovací frekvence
KV		Pásmo krátkých vln
$k_{FM}$	Hz/V	Konstanta frekvenční odchylky
L	H	Indukčnost
$L_{1-n}$		Cívka, tlumivka
Log.		Logická (úroveň)



$m_a$	%	Hloubka modulace
$m(t)$	V	Modulační signál
$m_{FM}$		Moduační index
OZ		Operační zesilovač
P	W	Výkon
PM		Fázová modulace
PWM		Impulsně šířková modulace
R	$\Omega$	Odpor
$R_{1-n}$		Rezistor
SV		Pásmo středních vln
t	s	Čas
$\Delta t$	s	Časový interval
T	s	Perioda
TR		Transformátor
$T_{1-n}$		Tranzistor
$U_{AM}$	V	Napětí modulovaného signálu
$U_C$	V	Napětí nosného signálu
$U_{cc}$	V	Napájecí napětí
$u_c(t)$	V	Nosný signál
$U_{FM}$	V	Napětí modulovaného signálu
$U_m$	V	Napětí modulovaného signálu
$U_{SAT}$	V	Saturační napětí
$U_{PWM}$	V	Napětí modulovaného signálu
$\beta$		Modulační index
$\delta$	s	Šířka impulzu
$\theta_i(t)$	Rad	Okamžitá fáze impulzu
$\omega$	$s^{-1}$	Úhlový kmitočet

# Obsah

1	Úvod.....	2
2	Teoretická část – Modulované signály.....	3
2.1	Spojité a diskrétní signály .....	3
2.2	Signály v modulacích.....	5
2.3	Modulace.....	6
2.3.1	Amplitudová modulace .....	7
2.3.2	Frekvenční modulace .....	10
2.3.3	Pulsní šířková modulace .....	14
3	Praktická část - Realizace.....	18
3.1	Modulátor AM .....	18
3.1.1	Blokové schéma .....	19
3.1.2	Obvodové schéma .....	19
3.1.3	Naměřené výsledky.....	21
3.2	Modulátor FM .....	24
3.2.1	Blokové schéma .....	25
3.2.2	Obvodové schéma .....	26
3.2.3	Naměřené výsledky.....	28
3.3	Modulátor PWM .....	32
3.3.1	Blokové schéma .....	32
3.3.2	Obvodové schéma .....	33
3.3.3	Naměřené výsledky.....	36
4	Laboratorní úloha.....	38
5	Závěr .....	39
	Litertura.....	40
	Seznam příloh .....	42

# Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá měřením modulovaných signálů osciloskopem a spektrálním analyzátozem. K tomuto účelu byly vybrány tři modulace. První z nich je amplitudová (AM), následuje frekvenční (FM) a nakonec impulsní šířková (PWM). Jelikož se jedná o poměrně složitá schémata a každá modulace by obsahově vystačila na samostatné téma, vyhledal jsem práce, které se touto problematikou zabývaly, a schémata upravil k vlastnímu účelu, přičemž jsem uvedl původní tvůrce schémat, která jsem použil jako základ pro svoji práci.

V druhé části se zabývám teorií všech tří modulací. Zejména jednotlivými druhy daných modulací, a to vyobrazení od nejjednodušších, až po složité, v praxi využitelné. Zmíním rozdílné charakteristiky jednotlivých modulací, přičemž upozorním také na výhody a nevýhody. Bakalářská práce se zaměřuje na modulace, které se budou využívat v laboratorních podmínkách, ale připomenu i praktické použití a dnešní využití. Důležitou částí této kapitoly bude taktéž vysvětlení pojmů, včetně matematického vyjádření a matematických modelů, které bezesporu souvisí s praktickým návrhem a jsou její součástí.

Třetí část obsahuje realizaci AM, FM a PWM modulátoru, které byly navrženy a odzkoušeny. Jsou zde popsána jednotlivá praktická schémata. Taktéž popisují jednotlivé funkční bloky modulátorů. Po návrhu následuje realizace desky plošných spojů. To znamená vytvoření architektury, rozmístění součástek a osazení. Součástí třetí části je také závěr a zhodnocení naměřených výsledků všech tří modulátorů. Jsou vysvětleny odchylky a odlišnosti od teoretických předpokladů.

Jelikož je to forma laboratorní úlohy a předpokládá se využití dále jako vzdělávacího přípravku, bude součástí bakalářské práce i vytvoření laboratorní úlohy pro studenty, kteří budou mít tyto modulátory zahrnuty ve výukovém plánu. Laboratorní úloha bude obsahovat všechny standardní části, tedy zadání, teoretický rozbor, použité přístroje a přípravky, postup měření a příslušné tabulky a schémata a doplňující otázky.

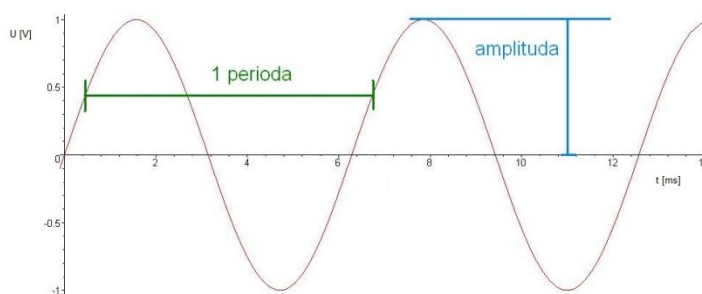
# 1 Teoretická část – Modulované signály

Slova jako zpráva, informace, signál, jsou v hovorovém jazyce obecnými pojmy. V elektrotechnice a radiotechnice jsou tato slova významově vymezena a tvoří základní pojmy teorie radioelektroniky a rádiové komunikace. Pojem signál je vysvětlen jako sdělení upravené do podoby vhodné pro další zpracování nebo pro přenos komunikačním kanálem. V elektrotechnice se nejčastěji setkáme se signály elektrickými. Ve výjimečných případech můžeme narazit i na signály jiné a to například akustické nebo optické. Tato práce se omezí pouze na signály elektrické, které je zapotřebí rozdělit do několika základních kategorií [1].

## 1.1 Spojité a diskrétní signály

Elektrické signály jsou napěťového i proudového charakteru, mění se v čase a můžeme je vyjádřit jako funkci času. Analogové signály jsou spojité jak v čase, tak i v amplitudě. Pro lepší představu si můžeme představit výstupní signál mikrofону snímajícího hudbu [1].

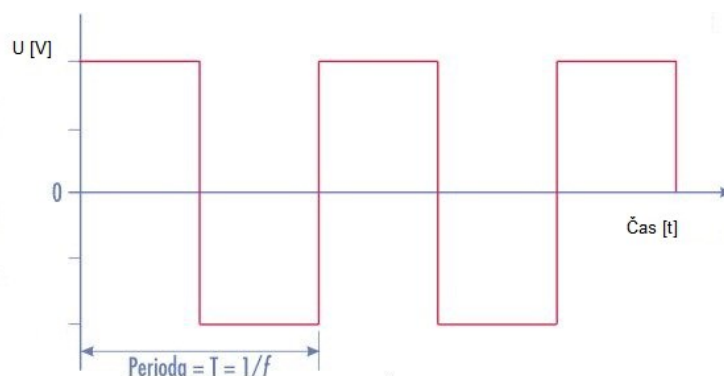
Analogový signál se může čistě teoreticky měřit v nekonečném rozlišení. Prakticky pouze do té míry, dokud nás nebude omezovat okolní šum [2]. Příklad jak může takový signál vypadat, je na obrázku 2.1.



**Obrázek 2.1: Analogový signál.**

Zato diskrétní signály jsou naopak charakteristické určitým druhem nespojitosti. Pokud je signál charakteristický tím, že má nespojitost v okamžité hodnotě (amplitudě, která může být v rámci daného rozsahu libovolná) a zachovává si spojitost v čase, hovoříme o nespojitosti nekvantované. Existuje ale i kvantová nespojitost, a to v případě, že amplituda může zaujímat pouze konečný počet diskrétních úrovní. Další skupinou jsou signály nespojité v čase, jinými slovy impulzové. Opět se můžou dělit na kvantované a nekvantované. (Je potřeba se zmínit, že ve výjimečných případech se kvantované i nekvantované signály mohou řadit pod signály spojité). Nejznámější skupinou diskrétních signálů jsou tzv. signály digitální (číslicové). Základem jsou signály kvantované v čase nespojité, procházející procesem kódování. Kódováním se rozumí

vyjádření velikosti kvantovaného vzorku pomocí několikamístné kódové skupiny, reprezentované většinou dvoustavovým (v některých případech i vícestavovým) elektrickým signálem [1]. Na obrázku 2.2 je uveden příklad diskrétního signálu.



**Obrázek 2.2: diskrétní signál.**

Signály se mohou dále rozlišovat jako deterministické a stochastické. Deterministické jsou takové, které lze jednoznačně matematicky vyjádřit analytickou funkcí času. U takového signálu se dá určit jejich funkční hodnota v libovolném okamžiku, respektive schopnost predikce. Nelze je díky tomu použít pro přenos informace, protože obsah informace se prakticky rovná 0. Ale mají uplatnění jako měřicí nebo nosné signály. Druhou zmiňovanou skupinkou jsou signály stochastické neboli náhodné, které nelze nijak předpovídat, ani u nich neexistuje žádná časová funkce. Do jisté míry jsou definovatelné, ale pouze na základě statistické nebo pravděpodobnostní charakteristiky, mezi něž patří střední hodnota, korelační funkce, apod. V této skupince tudíž nalezneme různá rušení, hluky nebo interference, které ztěžují přenos důležitých informací, respektive těch, které pro nás mají informační hodnotu [1].

Signály se dále dají dělit na periodické a neperiodické. Periodické signály jsou charakterizovány tím, že se jejich funkční hodnoty opakují a to s jistou pravidelností. Taková funkce času je popsána rovnicí (2.1).

$$f(t) = f(t \pm nT_0) \quad (2.1)$$

Kde  $T_0$  je konstanta nebo taky doba periody ( $0 < T < \infty$ ) a  $n$  je přirozené číslo. Neperiodické signály se liší jen tím, že nemohou podmínku (2.1) splnit [1].

Co se týče energie a výkonu, dělí se signály na energetické a výkonové. Tyto signály splňují určité podmínky a musí jim podléhat. Samotný energetický signál, aby se mohl takto nazývat, musí splňovat dvě základní podmínky. První podmínkou je, že energie energetického signálu se nesmí rovnat  $E \neq 0$ , tzn., musí mít vždy nenulovou energii, a druhou základní podmínkou pro uznání počítatelného energetického signálu je, že tato energie musí být konečná  $E < \infty$ .

Teoreticky se energie definuje podle vzorce (2.2a)

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt \quad (2.2a)$$

Výkonový signál musí splňovat obdobné podmínky, s rozdílem, že původní energie je definována jako energie za jednotku času > střední výkon  $P$ . Krom toho musí výkonový signál splňovat podmínky  $P \neq 0$  a  $P < \infty$ .

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt \quad (2.2b)$$

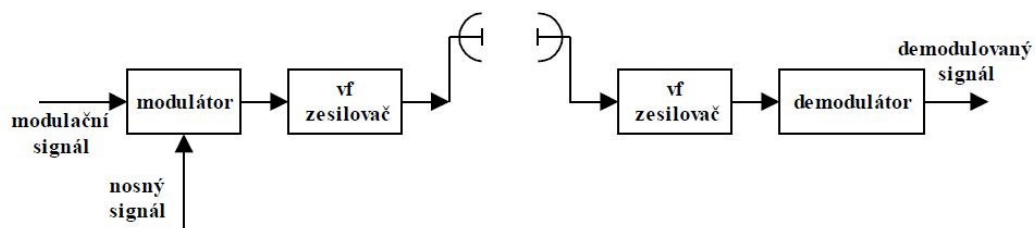
## 1.2 Signály v modulacích

Modulace, jakožto proces úpravy signálu znamená, že dva rozdílné signály se mohou ovlivňovat. Proces modulace je základním stavebním prvkem všech rádiových vysílacích systémů. Proč se to vlastně dělá? Ze dvou podstatných důvodů. Prvním je využitelná šířka pásma, která se při přenosu využívá (FM). Základem je tedy využití širokých pásem radiokomunikačního kanálu pro základní frekvenční pásmo signálu ze zdroje signálu. Širokopásmový charakter komunikačního kanálu umožňuje přenést vyšší počet různých signálů základního pásma v jednom komunikačním kanále, avšak za podmínky, že tyto signály budou modulací přeloženy ve vysílači ze základního pásma do oblasti vyšších frekvencí [3].

Jak již bylo řečeno, modulace se realizuje v modulátoru a zpracovávají se následující signály:

**Modulační signál** – může mít charakter spojitého nebo diskrétního signálu a obsahuje původní informaci, u které chceme, aby byla zachována v co nejlepší kvalitě. Informace obsažené v modulačním signálu by neměly být nijak zkresleny, nebo v horším případě ztraceny. V praxi se s tímto problémem setkáváme velmi často. Vždy se jedná o kompromis mezi kvalitou přenosu a cenou přístroje.

**Nosný signál** - je spojitý harmonický signál, většinou sinusový respektive kosinusový signál. Ten zaručuje přenos na dlouhé vzdálenosti. Díky jeho hodnotám jako například frekvence nebo amplituda, je ovlivněna následně celková kvalita přenosu. Jedná se tedy o důležité parametry. Výsledkem procesu modulace je tzv. **Modulovaný signál**, který mění své parametry v závislosti na obou signálech. Přesněji řečeno, je ovlivňován většinou dvěma základními parametry (frekvence a amplituda) a to je také základní aspekt, podle kterého modulace dělíme. V případě amplitudové modulace je z názvu jasné, že proměnnou zde bude amplituda, konkrétně amplituda modulačního signálu, která mění parametr amplitudy nosného signálu. V případě frekvenční modulace je proměnnou frekvence. V případě pulzně šířkové modulace je proměnnou šířka impulsu. Máme tedy popsány vstupní signály a výstupní signál jednoho funkčního bloku komunikačního schématu, respektive bloku, na který je tato práce primárně určena. Pro zpřehlednění situace je přiložen obrázek 2.3, který obsahuje všechny základní bloky rádiového komunikačního schématu.



**Obrázek 2.3: Radiokomunikační schéma[3].**

Ačkoliv součástí každého modulátoru nebo přijímače by měl být i demodulátor signálů, úkolem je pozorovat modulované signály na osciloskopu a spektrálním analyzátoru. Ve zkratce k dalším blokům: VF (vysokofrekvenční) zesilovač zesiluje modulovaný signál na požadovanou hodnotu vhodnou pro přenos signálu ve vzduchu na velké vzdálenosti. Výstupem je anténa. Vstupem přijímače je taktéž anténa s VF zesilovačem, který upravuje signál na požadovanou hodnotu pro demodulátor, který rozloží modulovaný signál a přizpůsobí ho k reprodukci nebo k dalšímu zpracování.

Výše zmíněný modulovaný signál je třeba změřit. Měřením se dá nazvat činnost nebo souhrn činností, které si kladou za cíl určit hodnotu měřené veličiny. Z toho se dá usoudit, že elektrické měření je měření elektrických veličin, a měření neelektrických veličin s využitím elektrických měřicích přístrojů. Měřicí přístroje je dále možné rozdělit do kategorie analogových a číslicových. Údaje analogového měřicího přístroje jsou spojité funkce měřené veličiny, zatímco číslicový přístroj poskytuje měřenou hodnotu v číslicovém tvaru. Důležitou součástí jsou měřicí převodníky. Ty transformují vstupní veličinu podle určité zákonitosti na výstupní veličinu. Celkem tvoří takzvaný měřicí řetězec, který představuje sérii měřicích členů, kterým signál prochází[9].

Důležitým parametrem měřicího přístroje je citlivost. Ta je definována jako poměr změny výstupní (údaj přístroje) veličiny ke změně vstupní (měřené) veličiny. Rozlišení je schopnost zaznamenat co nejmenší změnu měřené veličiny, která vyvolá změnu údaje na měřicím přístroji. Na druhou stranu, měřicí rozsah je vyjádřen změnou mezemi hodnot, ve kterých se může měnit měřená veličina, aby byla měřená se zaručenou přesností [9].

## 1.3 Modulace

Samotná definice modulace je formulována ve standardu IEEE, jako proces, při kterém se některý parametr nosné vlny (amplituda, kmitočet, fáze) mění v rytmu modulačního signálu. Jednoduše řečeno jde o metodu zakódování požadované informace do elektromagnetické vlny o frekvenci vyšší, než je obsažena v přenášené informaci [4].

### 1.3.1 Amplitudová modulace

Z pohledu historického se jedná o vývojově nejstarší modulaci. Na ní byly položeny základy moderní radiokomunikace datující se od roku 1900. Amplitudová modulace a její varianty se v současné době uplatňují pouze v jednoduchých komunikačních systémech, ač kupříkladu rádia nebo autorádia si tuto funkci pořád ponechávají, a některé stanice v ČR stále v AM vysílají. Tato ojedinělá existence má ale dekadentní charakter a s určitou jistotou se dá říci, že vymizí. Bude-li se měnit amplituda signálu modulované nosné vlny lineárně s modulačním napětím, vznikne amplitudová modulace, ovšem za podmínky, že relativní fáze modulované nosné vlny vůči fázi nemodulované nosné vlny je konstantní. Amplitudová modulace je typický představitel lineární modulace, což je proces, při kterém dochází k pouhému frekvenčnímu posunutí spektra modulačního signálu. Modulovaný signál tak obsahuje pouze ty frekvenční složky, které odpovídají posunutým složkám modulačního signálu. Obálka AM signálu není konstantní a z toho důvodu se za modulátorem používají lineární výkonové zesilovače, pracující buď ve třídě A anebo v dvojčinném zapojení ve třídě B; výkonová účinnost zesilovačů v tomto zapojení bývá nejvýše kolem 30 až 60% [3].

Ve frekvenčním spektru amplitudové modulace je nosná vlna a dvě postranní pásma -součtové a rozdílové (*DSB – Dual Side Band*). Mnohdy se ale z různých důvodů některé z těchto složek odstraňují, a tak vznikají modulace s jedním postranním pásmem (*SSB - Single Side Band*) nebo s potlačenou nebo alespoň redukovanou nosnou (*SC – Suppressed Carrier nebo RC – Reduced Carrier*)[3].

K pochopení principu amplitudové modulace se dají vyjádřit signály matematicky. Aby se dal modulovaný signál vyjádřit rovnicí, je zapotřebí definovat vstupní signály, tedy modulační  $m(t)$  a nosný  $u_c(t)$ . Nejčastěji se používají v teoretických příkladech s kosinovým tvarem a rovnice (2.3) a (2.4) popisují právě je.

$$m(t) = U_m \cdot \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t) \quad (2.3)$$

$$u_c(t) = U_c \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) \quad (2.4)$$

Výsledný modulovaný signál  $u_{am}(t)$  se vyjádří vztahem (2.5) :

$$\begin{aligned} u_{AM}(t) &= [U_c + U_m \cdot \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t)] \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) = \\ &= U_c \cdot [1 + m_a \cdot \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t)] \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

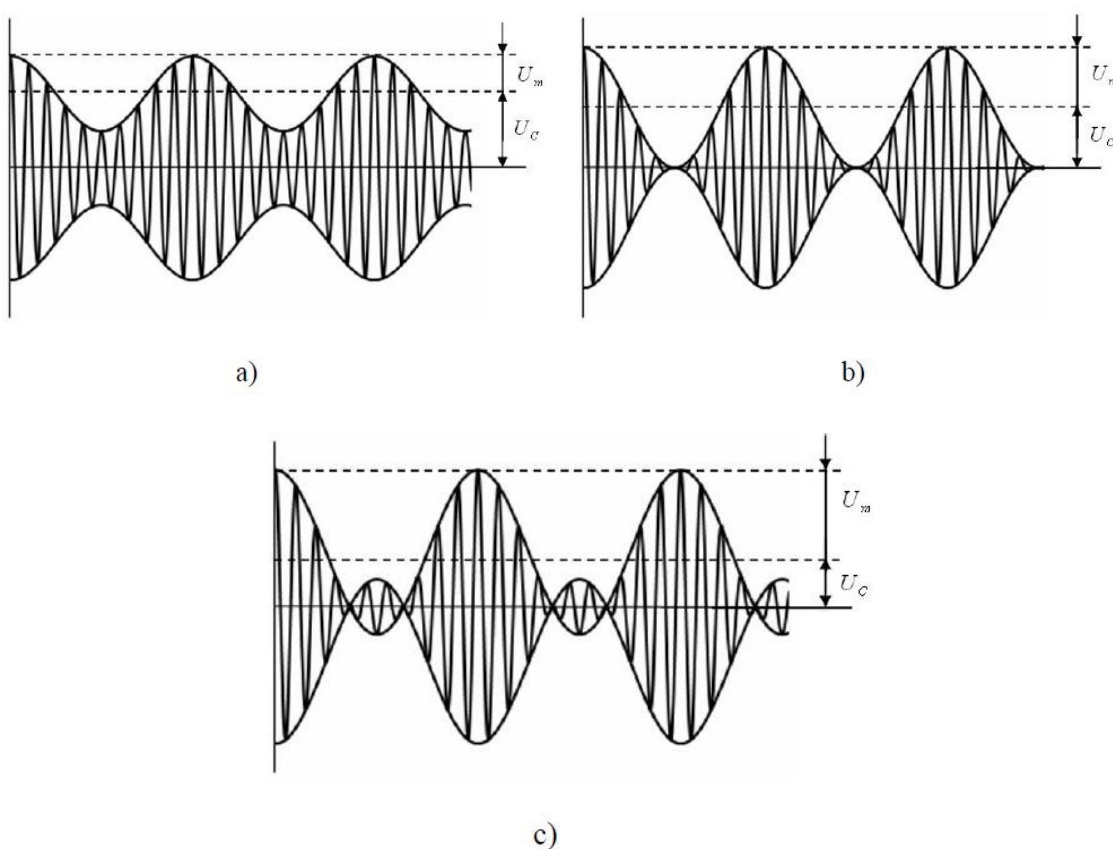
Ve výsledném vztahu se objevila nová veličina a to  $m_a$ . Je to tzv. činitel amplitudové modulace. Udává se zpravidla v procentech a určuje hloubku modulace. Není to nic jiného než podíl amplitudy nosného a modulačního signálu vyjádřený vztahem (2.6). Hloubka modulace je znázorněna na obrázku 2.4.



Činitel amplitudové modulační musí splňovat dvě základní podmínky, a to že  $m_a \geq 0$ , a zároveň  $m_a \leq 1$ . Pokud nastane situace, kdy tyto podmínky nejsou dodrženy, modulovaný signál bude zkreslený, respektive přemodulovaný, jak lze vidět na obrázku 2.4c.

$$m_a = \frac{U_m}{U_c} \quad (2.6)$$

V případě že činitel amplitudové modulační bude roven 1, v procentuálním výsledku 100%, znamená to, že je dosaženo maximálního stupně modulační, jak je vidět na obrázku 2.4b. Obrázek 2.4a znázorňuje případ, kdy by se činitel  $m_a$  rovnal 0,5 neboli  $m_a = 0,5 = 50\%$ .



**Obrázek 2.4: Hloubka amplitudové modulační[3].**

**a) činitel amplitudové modulační  $m_a = 50\%$**

**b) činitel amplitudové modulační  $m_a = 100\%$**

**c) činitel amplitudové modulační  $m_a = 150\%$  - přemodulovaný signál**

U přemodulovaného signálu je jasně patrné překrývání spodních apexů přes sebe. Vznikající překmity vyvolávají zkreslení signálu a i informace, kterou tento signál nese.

Tomuto stavu je třeba se vyhnout. Další podstatnou podmínkou nezkrácení signálu je ještě jeden faktor, a to poměr frekvence modulační a nosné. Jinými slovy, aby nedocházelo ke zkreslení signálu, je třeba stanovit frekvenci nosné vlny daleko vyšší, než frekvenci modulační. Tento fakt má zásadní vliv na kvalitu signálu při přenosu. Ale běžný uživatel radiotechniky u ladění stanic potřebuje jediný údaj, a to na jaké amplitudě je požadovaná rádiová stanice. V rádiovém přenosu je ale důležitý i jiný aspekt úspěšného vysílání, a to výkon, s jakým se vysílá, respektive výkon signálu AM. Samotný výpočet je postaven na skládání dílčích složek výkonu.

Vztah pro výpočet výkonu při zátěži  $R=1\Omega$  je následující:

$$P_{AM} = \overline{u_{am}^2(t)} = \overline{U_c^2 \cdot \cos(\omega_c \cdot t)} + \overline{m^2(t) \cdot \cos(\omega_c \cdot t)} + \overline{2 \cdot U_c \cdot m(t) \cdot \cos(\omega_c \cdot t)} \quad (2.7)$$

Rozdělí si jednotlivé složky a nadefinují se:

$$\overline{U_c^2 \cdot \cos(\omega_c \cdot t)} = \frac{1}{2} \cdot U_c^2 = P_c \quad (2.8)$$

Vztah (2.6) vyjadřuje střední výkon signálu  $u_c(t)$ .

$$\overline{m^2(t) \cdot \cos(\omega_c \cdot t)} = \frac{1}{2} \cdot \overline{m^2(t)} \quad (2.9)$$

V tomto případě je  $\overline{m^2(t)}$  střední výkon modulačního signálu  $m(t)$ .

$$2 \cdot U_c \cdot \overline{m(t) \cdot \cos(\omega_c \cdot t)} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot U_c \cdot \overline{m(t)} = U_c \cdot \overline{m(t)} \quad (2.10)$$

Veličina  $\overline{m(t)}$  představuje stejnosměrnou složku modulačního signálu  $m(t)$ . Za určitých podmínek lze napsat, že  $\overline{m(t)}=0$  z toho vyplývá, že vztah (2.7) můžeme přepsat jako (2.11)

$$P_{AM} = \overline{u_{am}^2(t)} = \frac{1}{2} \cdot U_c^2 + \frac{1}{2} \cdot \overline{m^2(t)} = P_c + \frac{1}{2} \cdot \overline{m^2(t)} \quad (2.11)$$

Kromě středního výkonu, je zajímavý i vrcholový výkon, který je zapotřebí znát například při navrhování zesilovače. Vrcholový výkon je dán vztahem (2.12) a je vztažen pro  $m(t)=1$ .

$$P_{AM\ MAX} = U_c^2 \cdot (1 + m_a)^2 \quad (2.12)$$

Za poznámku stojí, že k dosažení nejvyššího výkonu je zapotřebí, aby  $m_a$  dosáhla hodnoty 1. Samotná amplitudová modulace má z hlediska užívání několik více či méně závažných nedostatků. U činitele amplitudové modulace  $m_a = 1$  spotřebovává nosná vlna, která nenese žádnou informaci, polovinu celkového výkonu modulovaného signálu, a obě postranní pásma nesoucí informaci, druhou polovinu, tedy každé čtvrtinu. Vzhledem k tomu, že obě pásma nesou stejnou informaci, vysílá se  $\frac{3}{4}$  výkonu zbytečně. Z těchto důvodů byly vytvořeny varianty amplitudové modulace, například potlačená nosná a jedno postranní pásmo [3].

*Amplitudová modulace s potlačenou nosnou DSB (DOUBLE SIDE BAND)* - Obsahuje pouze spektrální čáry prostorových kmitočtů, energeticky úspornější, větší odstup signálového šumu. Problémy s demulací je nutné napřed obnovit frekvenci nosné vlny. Někdy se používá DSB s částečně potlačeným jedním postranním pásmem (signály s nosnou nebo velmi nízkou spodní frekvencí modulačního pásma) – televizní přenos [3].

*Amplitudová modulace s potlačenou nosnou a jedním postranním pásmem SSB (SINGLE SIDE BAND)* – má jediné pásmo, energeticky výhodné, které má až 16krát menší výkon, ale vyžaduje složitější demodulátor na straně přijímače, protože je třeba přesně obnovit nosnou vlnu, a to frekvenčně i fázově s původní nosnou vlnou [3].

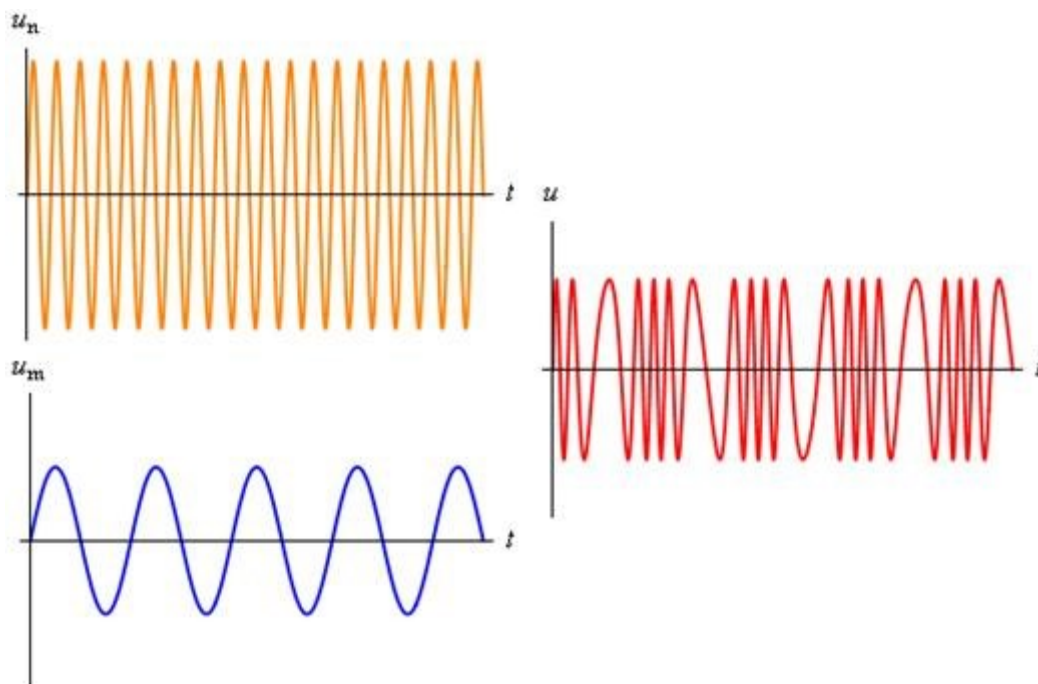
Amplitudová modulace představuje nejjednodušší a nejrozšířenější modulaci (rozhlasové vysílání KV, SV, DV, přenos obrazu a televizní vysílání).

*Nevýhody:* Malá energetická účinnost, modulovaná nosná vlna je značně ovlivňována rušivými signály – atmosférické signály působí na amplitudu. Malá šířka pásma. Nízká odolnost vůči rušení [3].

### 1.3.2 Frekvenční modulace

Po objevu amplitudové modulace se všemi jejími nedostatky, se postupem let začalo přicházet na další metody, jak modulovat signál. V roce 1934 byla představena frekvenční modulace (FM). Ta ve srovnání s amplitudovou modulací (AM) umožnila kvalitnější přenos zvuku a lepší energetickou efektivitu. Frekvenční modulace je i v současné době nejrozšířenější modulací používající se v radiokomunikaci, a amplitudová namísto toho upadá do historického zapomnění. Úspěch je dán několika faktory. Za velké výhody lze považovat především velkou efektivitu. Tedy všechno výkon je soustředěný v postranních pásmech nesoucí informaci. U amplitudové modulace, vzhledem k použitým filtrům a jejím zkosením hran, nelze použít blízké frekvence. V případě frekvenční modulace je využitelnost šířky pásma pro rádiové vysílání daleko větší. Krom větší efektivity je frekvenční modulátor konstrukčně jednodušší, než v případě amplitudové modulace, a to díky zavedení polovodičové technologie. Taktéž FM má daleko menší interferenci mezi vysílači pracujícími na blízkých frekvencích.

Příklad, jak obecně vypadá frekvenční modulace respektive vlivy modulační a nosné vlny na výslednou modulovanou vlnu, jsou na obrázku 2.5. Na něm je jasně vidět změna úhlu fáze průběhu a změna frekvence nosného signálu v závislosti na frekvenci modulačního signálu[4].



**Obrázek 2.5: Frekvenční modulace[6].**

Frekvenční modulace patří spolu s fázovou do kategorie úhlových modulací, protože se u nich modulačním signálem mění fázový úhel nosné vlny. Amplituda nosné vlny na rozdíl od AM zůstává zachována. U kmitočtové modulace se okamžitý kmitočet  $f_i$  modulovaného signálu rovná součtu konstantního kmitočtu  $f_c$  nemodulované nosné vlny a časově proměnné složky (relativní kmitočtové odchylky), přímo úměrné modulačnímu napětí  $m(t)$  [4].

Vztah je tedy definován jako vzorcem (2.13).

$$f_i(t) = f_c + k_{FM} \cdot m(t) \quad (2.13)$$

Člen  $k_{FM}$  ve vztahu znamená tzv. kmitočtovou citlivost modulátoru, jejíž jednotka je Hz/V. V praxi se hodnota konstanty pohybuje mezi čísly 5-7 Hz/V.

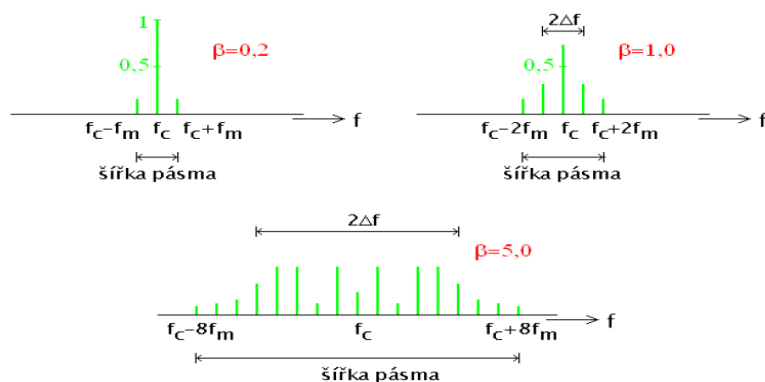
Vztah pro výpočet okamžité fáze signálu FM:

$$\theta_i(t) = 2\pi f_c t + 2\pi k_{FM} \int_0^t m(t) dt \quad (2.14)$$

Pro jednoduchost se předpokládá, že v čase  $t=0$  je fáze modulované nosné vlny rovněž nulová. Obecný vztah pro frekvenčně modulovaný signál v časové oblasti je (2.15).

$$u_{FM}(t) = U_c \cdot \cos \left[ 2\pi f_c t + 2\pi k_{FM} \int_0^t m(t) dt \right] \quad (2.15)$$

Jak již bylo výše zmíněné, využitelnost frekvenčního pásma je u FM daleko větší než u AM. Teoreticky je šířka pásma u FM neomezená. Prakticky jsou omezena a kupříkladu dělením rádiových stanic. V ČR je rozdělení po desetínách megahertzů. I FM může mít zkreslení, které se projeví při nedostatečném přenosu všech významných spektrálních složek. Tím se dostáváme k širokopásmovému FM přenosu ( $FM_{BB}$  – *Broad Band*). Tyto Modulace potřebují daleko širší pásma. Díky této šířce se zvyšuje poměr mezi signálem a šumem, což má příznivý vliv na kvalitě přenášené informace. Platí pravidlo, že čím širší je pásmo, tím menší je hodnota šumu, která signál zatěžuje. U širokopásmových modulací se používá k určení šířky index  $\beta$ . Ten by měl být mnohonásobně větší než 1. Jak ovlivňuje index šířku pásma, je znázorněno na obrázku (2.6) [4].



**Obrázek 2.6: Vliv modulačního indexu  $\beta$  na šířku pásma[4].**

Obrázek 2.6 ukazuje příklady spekter signálů s kmitočtovou modulací, při jediném harmonickém modulačním signálu o kmitočtu a při indexech modulační  $\beta=0,2$ ;  $\beta=0,5$ ;  $\beta=1,0$ ; dosahovaných změnou modulačního napětí při konstantním kmitočtu. Liché složky dolního postranního pásma mají opačnou fázi vůči složkám horního pásma, což můžeme v daném zobrazení respektovat tak, že se jim přiřadí „negativní“ amplitudy. Na tomto obrázku jsou však pro jednoduchost tyto fázové relace zanedbány [4].

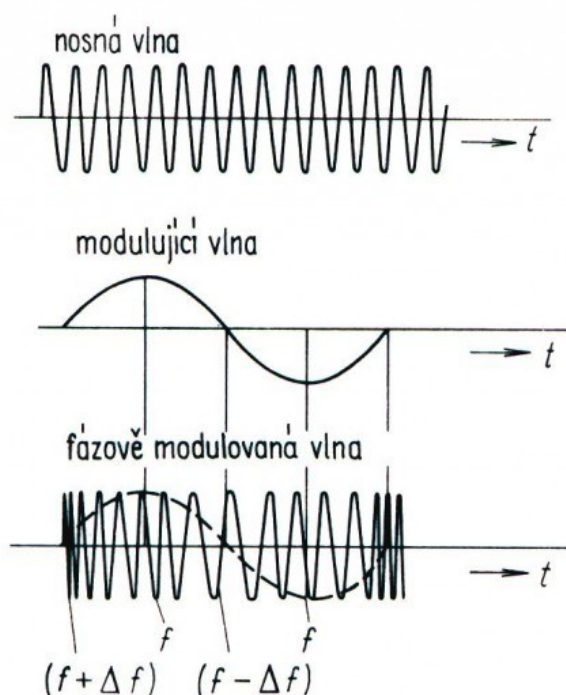
Na rozdíl od lineární modulační AM je tedy modulační FM zřejmě procesem nelineárním, kde neplatí princip superpozice postranních složek kmitočtového spektra [4].

Frekvenční modulační, jak bylo výše zmíněno, má mnoho výhod. Kromě jiných také velkou odolnost proti parazitním impulzním poruchám amplitudového charakteru. Taktéž u FM se při příjmu podobných frekvencí projeví majoritně intenzivnější signál, nesoucí užitečnou informaci, a rušivý je do jisté míry potlačen.

Další výhodou je daleko menší rušení vzájemných vysílačů, které pracují na stejné nosné frekvenci. Dodnes je FM nejvyužívanější rádiová modulace a krom toho je využívána i při družicovém příjmu TV.

Podobnou, avšak málo využívanou modulací, je fázová, která patří taktéž do kategorie úhlových modulací. U ní se mění okamžitý fázový úhel modulovaného signálu. Ten je roven součtu nedomulované nosné vlny a časově proměnné složky (relativní fázové odchylky), přímo úměrné modulačnímu napětí.

Pro znázornění vlivu fázové modulace na výsledný signál reprezentuje obrázek 2.7



**Obrázek 2.7: Fázová modulace[7].**

Všechny výše popsané modulace se řadí do kategorie tzv. analogových modulací, jejichž hlavními parametry jsou spojitost v čase, v amplitudě, kmitočtu, fázi a harmonické nosné vlny (především sinové a kosinové). Třetí modulace, použitá v této bakalářské práci, patří do skupiny diskrétních. Výsledkem těchto modulací je, na rozdíl od analogových, nespojitost, a to amplitudová, kmitočtová, fázová nebo kombinace dvou parametrů.

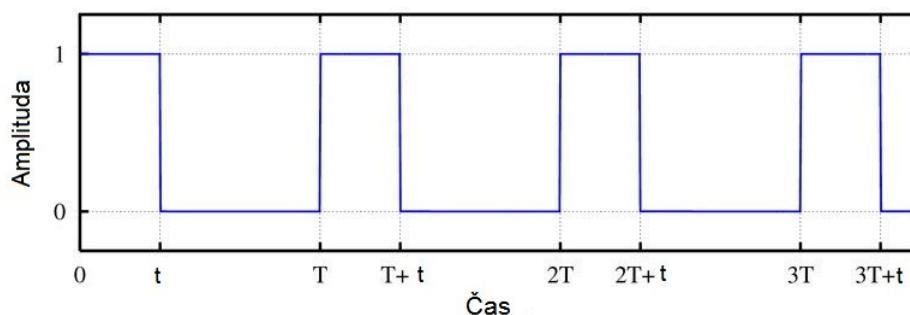
### 1.3.3 Pulsní šířková modulace

Jak již bylo řečeno, pulsní šířková modulace, zkráceně PWM (*Pulse Width Modulation*), patří mezi diskrétní modulace a to nekvantované. Zároveň s touto modulací přichází nový pojem - střída. Střída je definovaná jako poměr časů, ve kterých je signál v jednotlivých úrovních. Pokud se uvádí střída ve tvaru např. 1:1 (50%), je tím myšleno, že obě dvě úrovně signálu trvají stejně dlouho. Pokud je střída udána v procentech, myslí se tím obvykle doba trvání úrovně „zapnuto“ vůči celkové periodě signálu. (0% až 100%, 50% pro 1:1). V případě hodnoty 100% se na výstupu zobrazí logická jednička, a hodnota 0% se projeví na výstupu jako logická 0. Z toho vyplývá i omezení přenosu a to 0-100%. To ale znamená, že je nutná znalost parametrů vstupního modulačního signálu, aby se zabránilo přemodulování nebo nedostatečného využití a malé změny střídý [5].

Výpočet střídý je následující (2.16):

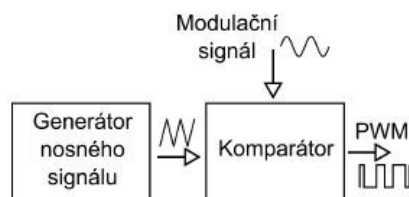
$$D = \frac{t}{T} ; \text{ kde } t \text{ je délka pulzu a } T \text{ je délka periody} \quad (2.16)$$

Pro ujasnění přiložen obrázek (2.8).



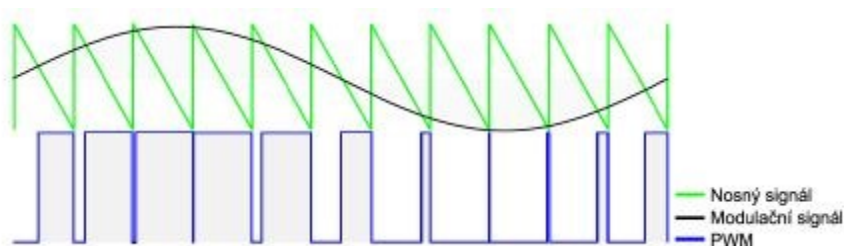
**Obrázek 2.8: Časový průběh signálu a střídý[8].**

Kromě často používané zkratky PWM, která vychází z anglického překladu, se taktéž výjimečně v literatuře objevuje česká zkratka PŠM. Na rozdíl od analogových modulací může signál u diskrétní modulace nabývat dvou hodnot - logické jedničky a logické nuly. Synonymum zapnuto a vypnuto. Kódování je prováděno za pomoci výše vysvětlených stříd. K přenosu signálu je použita proudová nebo napěťová realizace. Výjimkou není ani optický přenos. Funkční schéma modulátoru PWM je vcelku jednoduché. Zprvu je složeno z generátoru signálu. Tento generátor je potřeba pro vytvoření nosné vlny, kterou pak komparátor porovná s modulačním signálem, jak to je vidět na obrázku (2.9) [5].



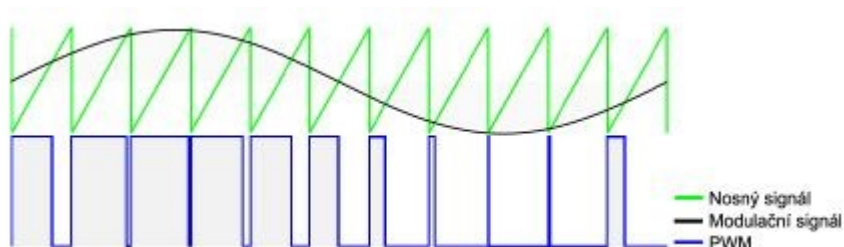
**Obrázek 2.9: Základní blokové schéma PWM modulátoru[5].**

Modulační signál je přiveden ze zdroje signálu, pod nímž si můžeme představit například výstup ovládání krokového motoru. V případě nosného signálu je použit většinou pilovitý nebo trojúhelníkový průběh. Přivedením modulačního a nosného signálu na vstup komparátoru se provede jejich porovnání, a v případě shody hodnot napětí je vyhodnotí jako logickou nulu překlacením do tohoto stavu. Výchozí stav komparátoru je logická 1. Podmínka pro správnou činnost PWM modulátoru je podobná jako u předchozích, a to, že nosný signál musí mít mnohonásobně větší frekvenci, než modulační. Minimálně alespoň dvakrát vyšší. PWM modulace se dělí podle toho, na jakou hranu komparátor reaguje. Obecně se dělí na modulovanou náběžnou a sestupnou hranu. Existuje i kombinace, tedy modulace na obě hrany. Rozdíly jsou patrné na obrázcích (2.10), (2.11) a (2.12) [5].



**Obrázek 2.10: Modulovaná náběžná hrana[5].**

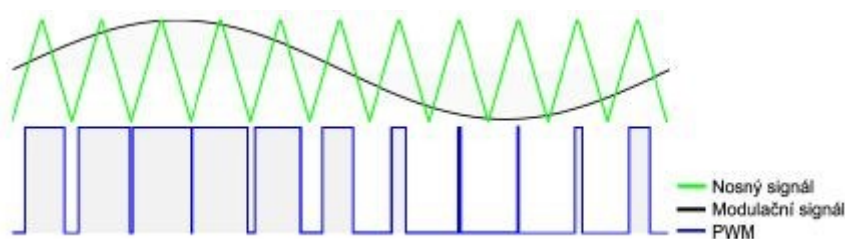
Jak z názvu vychází, je modulována náběžná hrana. Díky použití pilového průběhu nosného signálu s prudkou vzestupnou hranou je čas z log. 0 na log. 1 proměnlivý. Ale z log. 1 na log. 0 je stálý, neměnný.



**Obrázek 2.11: Modulovaná sestupná hrana[5].**



U modulované sestupné hrany je princip opačný než u modulované náběžné hrany. To znamená, že z log. 0 na log. 1 se čas nemění, ale je stálý, a namísto toho, kde se z log. 1 na log. 0 nemění, tak zde je čas proměnlivý. A to opět díky ostré hraně pilového průběhu, tentokrát sestupové.



**Obrázek 2.12: Modulovaná sestupná i náběžná hrana[5].**

V příkladu, kde je použita modulovaná sestupová i náběžná hrana, se používá trojúhelníkový průběh. Zde je proměnlivý čas jak u přechodu z log. 0 na log. 1, tak i na přechod z log. 1 na log. 0. Nicméně platí, že jakýkoliv použitý druh modulace nemá na výsledný signál žádný vliv, neboť všechny tyto druhy modulace mají v závěru stejné výsledné spektrum signálu.

Použití PWM modulace v praxi není nijak ojedinělé. Nachází se třeba i v audiotechnice. Například v audio zesilovačích, které pracují v pracovní třídě D. Ty pracují tak, že PWM signálem jsou spínány výkonové tranzistory, které mají nízký úbytek napětí při sepnutí. Tím, že tranzistory pracují ve dvou režimech (saturace a plné zavření), je zajištěna jejich vysoká efektivita a nízké ztráty. To přináší oproti jiným zesilovačům velikou výhodu, protože například elektronkové zesilovače mají obrovské ztráty už jenom při žhavení vláken elektronek. Tvrdí se však, že tranzistorové audio zesilovače mají větší tendenci zvuk zkreslovat. U elektronkových zesilovačů převládá tvrzení, že jejich zvuk je o něco málo čistější a věrnější svému originálu. Toto nelze věrně dokázat z důvodu velkého rozptýlu citění zvuku u člověka [5].

Dalším příkladem použití jsou spínané zdroje. Ty pracují tak, že střídavé napětí ze sítě je můstkovým usměrňovačem usměrněno. Dále vstupní blok obsahuje ještě filtr, který toto napětí upravuje, respektive ho vyhlazuje. Potom na řadu přichází buď tranzistor, nebo jiný speciálně uzpůsobený obvod, který pracuje jako spínací prvek. Ten spíná stejnosměrné napětí, které je přivedeno na vstup. Díky tomu, že toto stejnosměrné napětí spíná o frekvenci v řádu desítek kHz, je z něj opět vytvořeno napětí střídavé, které má obdélníkový průběh, a toto napětí je přivedeno na vstup transformátoru. Používají se transformátory vysokofrekvenční. Díky tomu mohou mít velmi malé rozměry. Mohou být i vyleptány na desku plošných spojů. Výstupní napětí na transformátoru je dáno délkou sepnutí. Krátká délka sepnutí znamená nižší napětí, delší délka sepnutí vyšší napětí. Tímto je možné se dostat opět k základu principu impulsní šířkové modulace. Výhodami těchto zdrojů jsou především malé rozměry, hmotnost a účinnost. Nevýhodou je naopak nízká odolnost vůči vnějším rušivým vlivům nebo pomalá reakce na změnu výstupního napětí [5].

Častou další možností je využití PWM modulace ve výkonové elektronice. Zde se dá například narazit na regulátory řízení otáček elektrických stejnosměrných motorů.

Výhodou PWM modulace jako principu regulace otáček, je zachování točivého momentu motoru při nízkých otáčkách. Oproti regulaci napětím nebo proudem, jsou totiž obě složky zachovány, a tím nedochází k úbytku příkonu pro elektromotor. Dá se říci, že tento způsob regulace je bezztrátový. S PWM modulací se můžeme rovněž setkat například u modelářských servo motorů. Servo motorek může být vychylován pomocí PWM modulace jak ve směru otáčení hodinových ručiček, tak ve směru opačném. Poloha vychýlení na jednu nebo na druhou stranu je dána délkou sepnutí, respektive délkou trvání impulzu. Referenčním bodem je tzv. středová poloha. Tedy pro každý úhel otočení hřídele servomotoru je přiřazena určitá doba sepnutí[5].

PWM modulace má samozřejmě i další možnosti využití. Zde jsou uvedeny pouze ty častější. Aplikace elektroniky, ve kterých může být použita PWM modulace, jsou například regulace řízení svitu LED diod nebo použití v dálkových ovládacích, pracujících na principu infračervených diod.

## 2 Praktická část - Realizace

### 2.1 Modulátor AM

Konkrétní návrh vychází z diplomové práce [3]. Na rozdíl od původního schématu se provedly změny a modifikace. Tento modulátor slouží pro výukové účely v laboratorních podmínkách. Je to tedy deska plošných spojů, ke které budou přivedeny signály a napájecí napětí, a studenti studující na elektrotechnické fakultě si budou moci vyzkoušet základní principy amplitudové modulace, co se týče pozorování změn na spektrálním analyzátoru a osciloskopu. Obvod je variabilní v tom smyslu, že se na něj dají přivést signály z generátoru signálu, a sledovat změny na výstupu, pomocí již zmíněných vyhodnocovacích zařízení. Vzhledem k laboratorním podmínkám je třeba provést určitou standardizaci komponentů desky plošných spojů, pro snadnější manipulaci a obsluhu v laboratořích. Vzhledem k tomu, že se jedná o modulátor, a základem je vyhodnocování signálu, byla deska zvolena s tzv. rozlitou zemí pro stínění před rušivými vlivy. Taktéž jsou použity BNC vstupy a výstupy pro zjednodušení manipulace. Rovněž bylo stanoveno standardizované napětí  $U_{cc}$ , a to 15V, pro všechny desky, s cílem ulehčit manipulaci s modulátorem a co nejjednodušší obsluhu. Co se týče samotné výroby desky plošných spojů, byla realizována v laboratořích elektrotechnické fakulty. Při výrobě bylo využito fotocitlivé desky plošných spojů. Vytiskl se pauzovací papír s předlohou (viz Příloha 4). K ní byla zvolena odpovídající velikost desky s fotocitlivou svrchní vrstvou.

Před fotocitlivou vrstvou se vloží filmová předloha motivu. Ta může být v závislosti na použitém fotocitlivém materiálu buď pozitivní, nebo negativní [12].

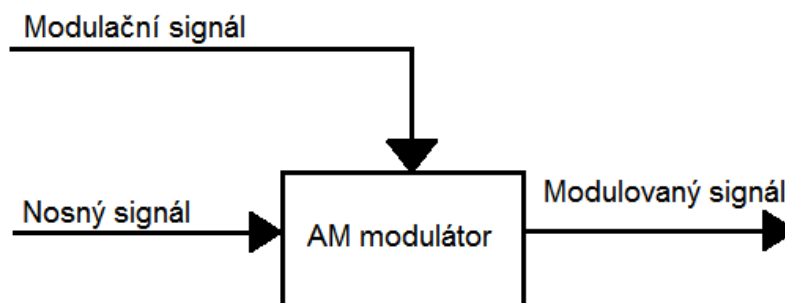
Vše bylo založeno do kazety se skleněnou svrchní deskou, která slouží pro správné slícování předlohy a desky. Tato kazeta se následně vložila do boxu s UV zářivkami a osvětila se fotocitlivá vrstva. Osvícení trvalo přesně 5 minut.

Výsledná kvalita ozáření závisí výhradně na kvalitě předlohy, která by měla být dokonale kontrastní. Pro exponaci se používá UV záření. [12].

Takto upravená deska se vložila do vývojky s pozitivní fotoemulzí. Následně po očištění se deska ponořila do leptacího roztoku (chemickým složením chlorid železitý  $\text{FeCl}_3$ ), který vyleptal osvěcená místa a ta neosvěcená zanechal neporušená. Kvalita vyleptání přímo úměrně závisí na kvalitě osvěcení a doby strávené v leptacím roztoku. Do desky byly následně vyvrtány díry pro umístění součástek, posléze byla osazena a vyzkoušena. Osazení součástek bylo realizováno na základě schématu (příloha č. 4). V poslední části bylo třeba zkontrolovat správnost zapojení a schopnost správně pracovat podle výše zmíněných podmínek. V závislosti na tom byla vytvořena laboratorní úloha, která bude součástí studia studentů, využívající tento přípravek v laboratoři. Z toho vyplývá, že bylo nutné s tímto přípravkem naměřit takovouto zkušební laboratorní úlohu a optimalizovat ji tak, aby zabrala celou vyučující hodinu. K tomu je třeba přidat upozornění, které ochrání tento přípravek před zničením.

### 2.1.1 Blokové schéma

Amplitudový modulátor je z hlediska blokového schématu velice jednoduchý. Tvoří ho vlastně jediný blok, a to samotný modulátor. Do bloku jsou vedeny dva vstupy pro modulační signál, značený jako  $m(t)$ , a nosný signál  $u_c(t)$ . Výstupem z bloku je modulovaný signál  $u_{am}(t)$ . Všechny vstupy a výstupy jsou standardizovány. Rovněž možnost změny hodnoty nosného signálu pomocí oscilátoru nebo generátoru signálu je důvodem k otestování kvality nosného signálu a vliv hodnoty na kvalitě výstupního modulovaného signálu.



Obr. 3.1: Blokové schéma AM modulátoru.

### 2.1.2 Obvodové schéma

Amplitudový modulátor je realizovaný jako tranzistorový bázový. To znamená, že na bázi je přiveden jak modulační  $m(t)$  tak i nosný signál  $u_c(t)$ . V začátku návrhu se počítalo s amplitudou nosného signálu 3,5 V, proto je nosný signál na desce ošetřen napěťovým děličem, který tuto hodnotu sníží na 130mV, a díky tomu se nepřebudí tranzistor T1, který je zodpovědný za modulaci.

Režim saturace může nastat, pokud je proud do báze tak velký, že výsledná injekce elektronů z emitoru způsobí tak velké zaplavení přechodu báze – kolektor, že dojde ke změně polarizace přechodu B – C ze závěrného do propustného směru [11].

Na stejnou bázi je rovněž přiveden i modulační signál  $m(t)$ , který je stejně jako nosný signál veden z externího generátoru signálu.



Před bází je však ještě vložen kondenzátor C3, který odděluje stejnosměrnou složku a tím předchází ovlivnění pracovního bodu tranzistoru T1. Samotný tranzistor je zapojen se společným emitorem a pracovní bod je nastaven v poloze B a naměřené napětí  $U_{BE}$  a  $U_{CE} = 0,5V$ . Odpor R15, připojený k emitoru, zajišťuje kolektorový proud  $I_c = 0,02mA$ . Úbytek na odporu R15 je  $U_{R15}=9,76V$ . Jak již bylo zmíněno, tranzistor T1 má nastavený pracovní bod B. To znamená, že je v jedné půlperiodě otevřený a v druhé zavřený a je zde použit jako nelineární prvek, což je důležité pro správnou funkčnost. Na bázi je přiveden součet, ale ten se musí převést na součin. Toho se dosáhne rezonančním obvodem, připojeným ke kolektoru, a složeným z kondenzátoru C1 a C2 a primárního vinutí transformátoru TR2. Tento rezonanční obvod je rovněž vstupem na primární vinutí transformátoru TR2, což je součást druhého oddělovacího bloku pro výstupní signál. Rezananční frekvence se vypočítá

podle vztahu:

$$f_{LC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot (C_1 \cdot C_2)}} \quad (3.1)$$

$$f_{LC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,047 \cdot (33 \cdot 10^{-12} \cdot 33 \cdot 10^{-12})}} = 2,22 \times 10^{10} Hz \quad (3.2)$$

Vzniklý modulovaný signál  $u_{AM}(t)$  odpovídá vztahu:

$$u_{AM}(t) = [U_c + U_m \cdot \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t)] \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) = U_c \cdot [1 + m_a \cdot \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t)] \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) \quad (3.3)$$

a časovému průběhu na sekundárním vinutí TR1.

### 2.1.3 Naměřené výsledky

K naměření výsledků bylo zapotřebí laboratoře a laboratorního vybavení. K napájení bylo využito stejnosměrného laboratorního zdroje Hadex EP-613, s napětiovým rozsahem 0 – 30V. Napájecí napětí bylo zvoleno 10V, ačkoliv je možné až 15V. K modulátoru jsou přivedeny dva zdroje signálu. Modulační signál byl přiveden z funkčního generátoru Tektronix AFG 3022 se sériovým laboratorním číslem 26178. Nosný signál byl převeden z generátoru signálu, který je integrovanou součástí osciloskopu Agilent MSO-X2024A. S maximální frekvencí 20MHz a amplitudou 5V, byl pro tento signál naprosto dostačující. Ten samý osciloskop byl použit pro měření modulovaného signálu.

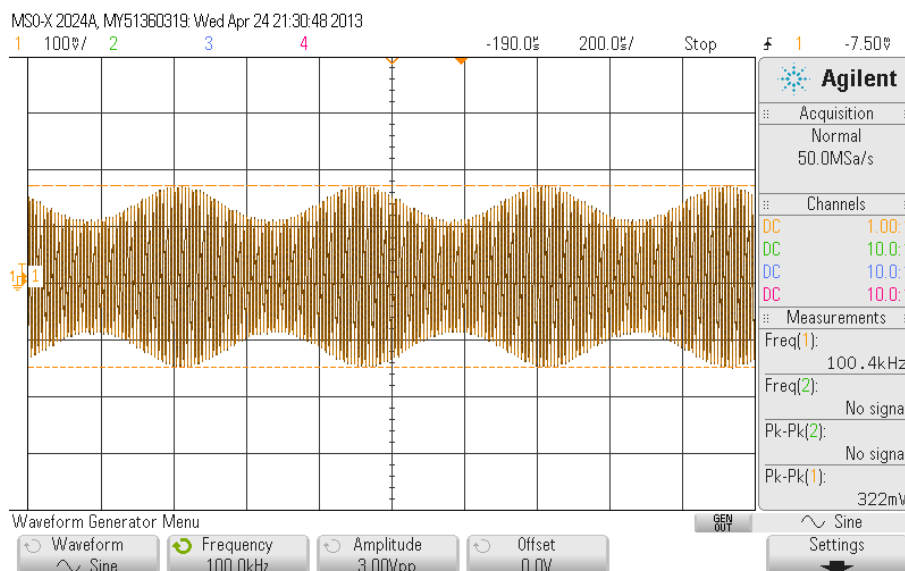
Osciloskop Agilent patří do skupiny číslicových osciloskopu. Využívá číslicové paměti a signál digitalizuje za pomoci analogově-digitálního převodníku.

Kódované hodnoty se uloží do paměti a zobrazí se po rekonstrukci na displej osciloskopu nebo v podobě grafického výstupu v počítači. Jako každý digitální osciloskop, umožňuje Agilent mnohakanálový současný záznam, který je v této práci mnohokrát využitý [9].

Výstup z modulátoru byl připojen k prvnímu kanálu osciloskopu. Následně byly nastaveny parametry modulačního signálu –  $f_m = 1\text{kHz}$ ,  $U_m = 250\text{mV}$ . Hodnoty nosného signálu byly –  $f_c = 100\text{kHz}$ ,  $U_c = 3\text{V}$ . Výsledku odpovídá obrázek 3.3. Díky vertikální ose s rozlišením  $100\text{mV}$  na dílek byla dopočítána hloubka modulace pomocí vztahu (3.4).

$$ma = \frac{(U_{max} - U_{min})}{(U_{max} + U_{min})} \quad (3.4)$$

Tento vztah lze použít při vyhodnocení 3.3 a 3.4 naměřeného výstupního modulovaného signálu.

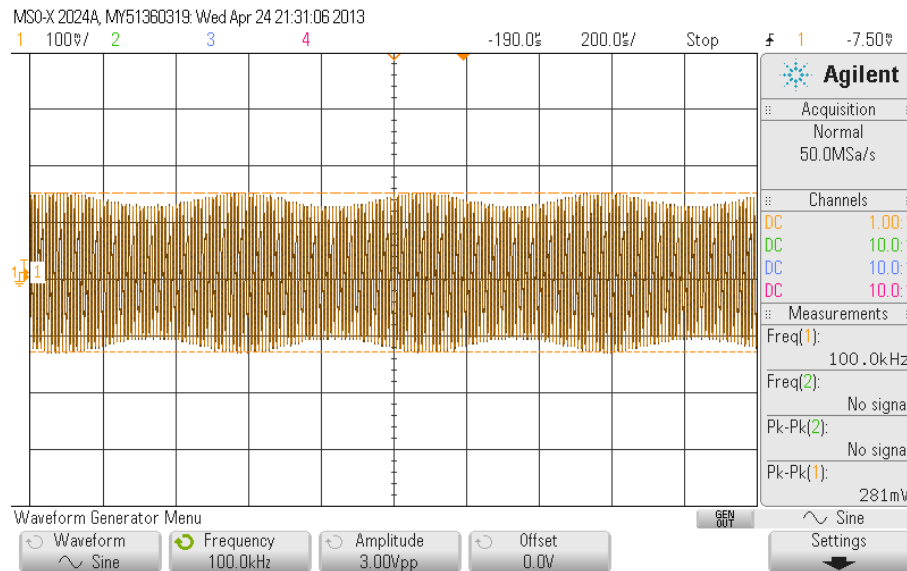


**Obr. 3.3: Výsledná amplitudová modulace s  $ma = 23\%$ .**

$$ma = \frac{(0,16 - 0,1)}{(0,16 + 0,1)} = 0,23 \cdot 100 = 23\%$$

Hodnoty k obrázku 3.4 jsou u modulačního signálu –  $f_m = 1\text{kHz}$ ,  $U_m = 100\text{mV}$  a parametry nosného signálu jsou –  $f_c = 100\text{kHz}$ ,  $U_c = 3\text{V}$ . Tvar modulačního i nosného signálu byl po celou dobu měření zachován sinusový.

Analýza dalšího naměřeného průběhu výstupního signálu poukazuje na hloubku modulae pouhých 7%. Změna oproti hloubce modulae 23% je na první pohled viditelná. Amplitudový modulátor tedy plní svoji činnost.



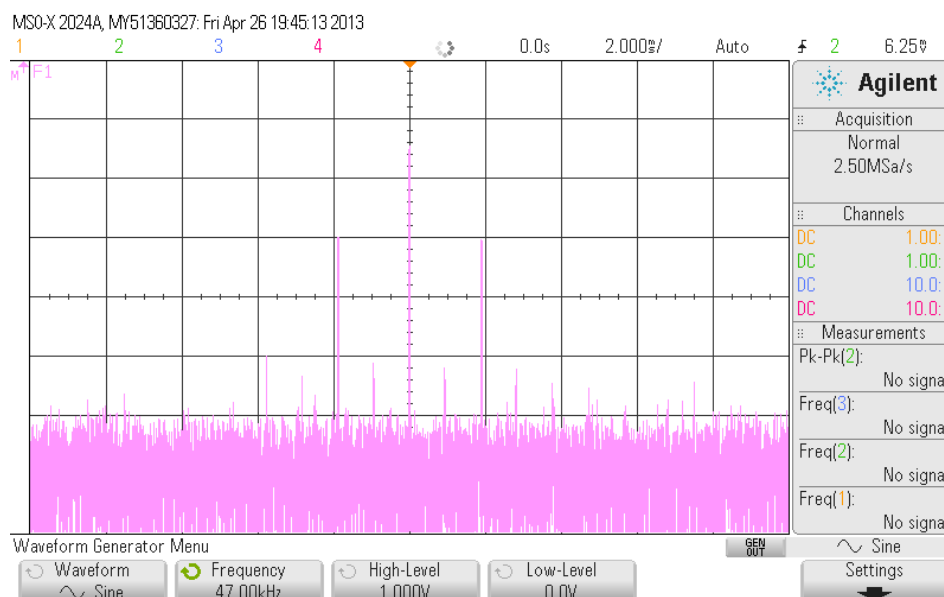
**Obr. 3.4: Výsledná amplitudová modulae s  $ma = 7\%$ .**

$$ma = \frac{(0,14 - 0,12)}{(0,14 + 0,12)} = 0,07 \cdot 100 = 7\%$$

Pro kontrolu výstupu lze modulovaný signál demodulovat, ovšem toto řešení není v zadání práce, proto ho ani konečný přípravek neobsahuje.

I spektrální analyzátor potvrzuje svou charakteristikou přítomnost amplitudové modulae, a tedy jasně danou nosnou frekvenci a vedle ní separované postranní pásma.





**Obr. 3.5 : Frekvenční spektrum modulovaného AM signálu.**

## 2.2 Modulátor FM

Návrh vychází z diplomové práce [4]. Na rozdíl od původního schématu bylo provedeno několik změn, ovlivněných zadáním s doporučenými požadavky. Modulátor má za úkol sloužit jako přípravek pro výukové účely v laboratorních podmínkách. Skládá se z desky plošných spojů, osazené volně dostupnými konvenčními součástkami. Jelikož samotný modulátor už v návrhu zahrnuje integrovaný oscilátor, který produkuje nosný signál, k desce se přivádí pouze modulační signál a napájecí napětí, a studenti, studující na elektrotechnické fakultě, si budou moci vyzkoušet základní principy frekvenční modulace, které se týkají pozorování změn na spektrálním analyzátoru. Modulátor není tak variabilní jako předchozí amplitudový, v tom smyslu, že na něj nelze přivést nosný signál. Je však možno ovlivňovat parametry modulačního signálu a díky tomu sledovat změny na výstupu, pomoci již zmíněného vyhodnocovacího zařízení. Vzhledem k úvaze, že modulátor, respektive všechny vytvořené přípravy, budou sloužit v laboratorních podmínkách, je třeba provést určitou standardizaci komponentů desky plošných spojů, pro snadnější manipulaci a obsluhu v laboratořích. Jelikož se jedná o přípravek k vyhodnocení signálů, deska je zvolená s tzv. rozlitou zemí pro stínění rušivých vlivů. Rovněž byly použity vstupy a výstupy s BNC konektory, pro zjednodušení manipulace při zapojení přípravku k měřicím přístrojům. Zároveň bylo upraveno napájecí napětí na 15V, aby všechny desky měly stejné hodnoty a nedocházelo ke zvyšování šance zničit přípravek nadpětím.

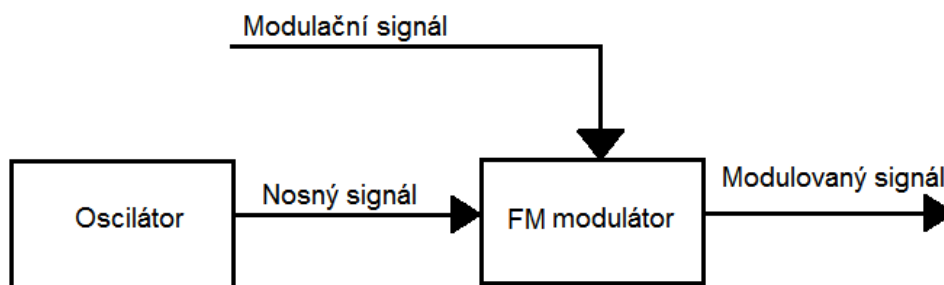
Samotná výroba desky plošných spojů byla provedena naprosto stejně jako v případě AM modulátoru, a tedy byla vytvořena v laboratořích elektrotechnické fakulty. Při výrobě bylo použito fotocitlivé desky plošných spojů. Stejně jako u AM byla předloha vodivých cest vytisknuta na pauzovací papír (viz Příloha 5). V závislosti na předloze byla zvolena velikost desky.

Na tuto desku s odhalenou fotocitlivou vrstvou se přiložila předloha, řádně se slícovala, a posléze založila do kazety se skleněnou svrchní deskou, která slouží pro správné dodatečné slícování předlohy a desky, a zabraňuje volnému posunu předlohy při ozařování. Kazeta se vložila do boxu s UV zářivkami a osvítila se fotocitlivá deska. Po 5 minutovém osvětlení se deska vložila do vývojky. Následně po očištění leptací roztok ( $\text{FeCl}_3$ ) vyleptal osvětlená místa. Do desky byly posléze vyvrtány díry pro umístění součástek. Osazení součástek bylo realizováno na základě schématu (příloha č. 5).

Po osazení se zkontrolovala vodivost jednotlivých drah a eliminování případných zkratů, které mohou nastat i při sebedokonalejším leptání nebo pájení. Poté se přípravek vyzkoušel, zdali vykazuje správnou funkci podle výše zmíněných podmínek. Na základě naměřených výsledků byla vytvořena laboratorní úloha, která bude součástí studia studentů, využívajících tento přípravek.

## 2.2.1 Blokové schéma

Frekvenční modulátor je z hlediska blokového schématu velice blízký amplitudovému modulátoru, krom jednoho podstatného detailu, a to přidaného oscilátoru, který představuje zdroj nosné frekvence. Proto ho v tomto případě tvoří dva bloky, a to samotný modulátor a již zmíněný oscilátor. V blokovém schématu figuruje pouze jeden vstup, a tím je modulační signál, označený jako  $m(t)$ . Výstupem z bloku je modulovaný signál  $u_{fm}(t)$ . Všechny vstupy a výstupy jsou standardizovány. Zde není možnost změny hodnot nosné frekvence pomocí oscilátoru nebo generátoru signálu, protože samotný oscilátor je zabudovaný do desky plošných spojů. Nicméně k otestování kvality postačí modulační signál a konkrétně změny frekvence a amplitudy vůči stanoveným hodnotám nosného signálu.

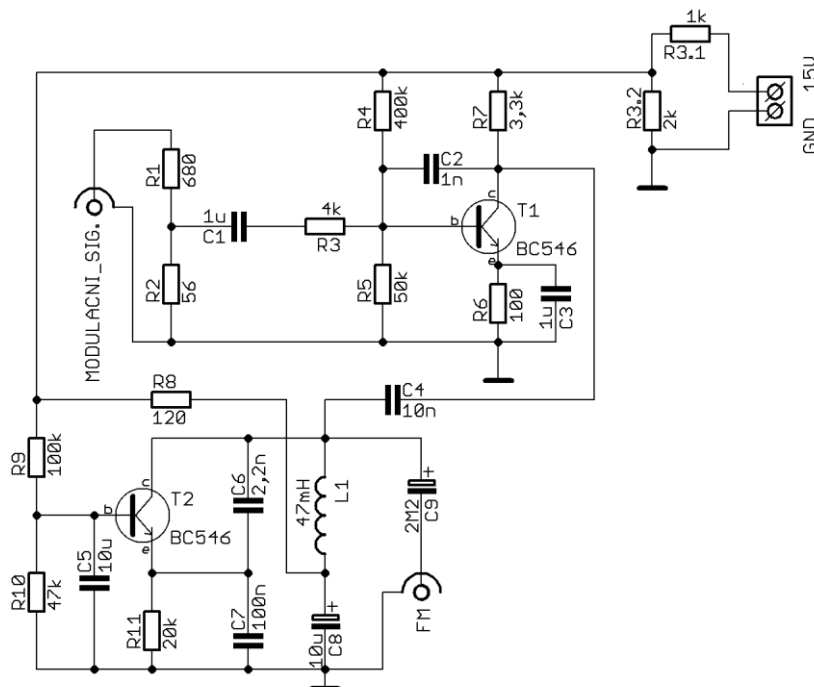


**Obr. 3.6: Blokové schéma FM modulátoru.**

Frekvenční modulátor je realizovaný jako tranzistorový oscilátor, který je rozladován reaktančním tranzistorem. Tento princip je možný realizovat za pomoci impedančního děliče, který vytvoří výstupní impedanci tranzistoru, a to buď kapacitního, nebo induktivního charakteru. Tento dělič ale musí taktéž posunout fázi vstupního napětí tranzistoru a fází kolektorového proudu o  $90^\circ$ . Jedna impedance je vždy představována ohmickým odporem a druhá čistou reaktancí. Princip funkce modulátoru spočívá v tom, že modulační nízkofrekvenční signál  $m(t)$  je přiveden na reaktanční tranzistor. Tím je ovlivněna výstupní impedance bloku pro modulační signál  $m(t)$ . Díky tomuto reaktančnímu tranzistoru se rozladuje oscilátor, který v podstatě funguje jako směšovač. Toto smísení je základem pro tento princip modulace, protože na výstupu se vytvoří frekvencí modulovaný signál  $u_{fm}(t)$ . Tedy frekvence nosného signálu  $u_c(t)$  je pomocí reaktanční tranzistoru ovlivněna frekvencí modulačního signálu. Návrhu počítá s hodnotou nosného signálu  $f_c = 10\text{kHz}$ .

### 2.2.2 Obvodové schéma

Modulační signál  $m(t)$  je ihned na vstupu v obvodu upraven napěťovým děličem sestaveným z rezistorů R1 a R2. Stejnosemernou složku odstraňuje kondenzátor C1 a takto upravený modulační signál je přiveden na reaktanční tranzistor T1, který rovněž funguje jako zesilovač signálu přivedený na bázi. Další důležitou součástí, která je umístěna hned za reaktančním tranzistorem T1 je kondenzátor C4. Neboť ten slouží jako oddělovací člen mezi oběma tranzistory T1 a T2.



Obr. 3.7: Obvodové schéma navrženého FM modulátoru.

Rovněž spolu s kondenzátory C1 a C2 slouží jako zkrat pro signál z oscilátoru a zamezí ovlivňování výstupu reaktančního tranzistoru, což by mělo za následek jeho celkově zhoršenou funkci celého modulátoru, co se týče rušení a parazitních jevů. Oba tranzistory T1 a T2 jsou stejného typu, a to BC 546B.

Tento tranzistor je bipolární typu NPN. Základní vlastnost prvku je schopnost řídit malým proudem pomocí řídicí elektrody – báze. Tím se mění odpor řízeného obvodu mezi kolektorem a emitorem. Činnost tranzistoru je založena na vzájemné interakci mezi dvěma přechody PN [10].

Výstup z modulátoru je opatřen rezonančním obvodem tvořeným cívku L1o hodnotě 47mH a dvěma kondenzátory o hodnotě 100nF a 2,2nF.

Rezonanční kmitočet se vypočítá:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{100 \cdot 10^{-9} \cdot 4,7 \cdot 10^{-9}}{100 \cdot 10^{-9} + 4,7 \cdot 10^{-9}} = 4,49 \cdot 10^{-9} F$$

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,047 \cdot 4,49 \cdot 10^{-9}}} = 10957 Hz$$

Za cívku řazený elektrolytický kondenzátor C<sub>9</sub>, sloužící opět jako filtr, který odděluje stejnosměrnou složku.

Elektrolytické kondenzátory mají vyšší kapacitu. Tu určuje extrémně malá tloušťka izolantu, který tvořen elektrolyticky získanou vrstvičkou oxidu. Nevýhodou elektrolytických kondenzátorů je velká citlivost na překročení jmenovitého napětí a přepólování. Při opačné polaritě působí jako odpor a vzniklé teplo může být příčinou i explozi kondenzátoru. Elektrolytické kondenzátory se používají zejména k filtraci zvlnění stejnosměrného napětí [10].

Vzhledem k tomu, že modulační signál je nastavován na externím generátoru, je potřeba dodržet několik zásad a pravidel k úspěšnému zajištění kvalitní modulace. První podmínkou je, že frekvence nosného signálu by měla být několikanásobně větší než frekvence modulačního signálu  $f_c \gg f_m$ . V praxi se používá desetinásobek. V tomto konkrétním případě je frekvence nosného signálu stanovena součástkami rezonančního obvodu, a její hodnota je 10kHz. Z toho vyplývá, že pokud chceme splnit tuto podmínku, zvolíme frekvenci nosného signálu 1kHz a méně. Tím předejdeme zkreslení modulovaného výstupu. Nicméně v laboratorní úloze bude zahrnuto cvičení, kde studenti mohou zjistit, od jakého násobku se zkreslení vytváří. A jaký mají následně narůstající násobky vliv na kvalitu modulovaného signálu. Dalším důležitým parametrem, který je nutný ve frekvenční modulaci, je šířka pásma, kterou analyzujeme spektrálním analyzátozem. Především nás zajímá spektrum signálů při jediném harmonickém modulačním signálu o frekvenci  $f_m$ . Zde se uplatňuje tzv. index modulace  $\beta$ .

Samotnou šířku pásma lze určit výpočtem za pomoci Carsonova vztahu.

$$B_v = 2 \cdot (1 + \beta) \cdot f_m \quad (3.5)$$

Kde  $\beta$  se vypočítá jako:

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} \quad (3.6)$$

Kde  $\Delta f$  se vyjádří jako:

$$\Delta f = k_{FM} \cdot U_m \quad (3.7)$$

$\Delta f$  je kmitočtový zdvih modulovaného signálu a  $k_{FM}$  je konstanta. Šířka FM pásma je velice důležitá pro kvalitu přenášeného signálu. To znamená, že i správné nastavení amplitudy je pro přenos důležité. Tabulka 3.3.2 vyjadřuje amplitudy jednotlivých složek tzv. Besselovy funkce, což je funkce pro vyjádření spektra FM signálu. „Tabulka jasně dokazuje, že jednotlivé amplitudy mohou nabývat nejrůznějších hodnot. A přitom Nezáleží na jejich pořadí, amplitudy uprostřed spektra mohou být menší než amplitudy kmitočtů vzdálenějších. Na okrajích spektra ale vždy vykazují rychlý pokles. Spektrum signálu má nekonečné množství dvojic spektrálních čar symetricky rozložených kolem nosné vlny. Jejich velikost je určena Besselovými funkcemi. Amplitudy mohou nabývat i záporných hodnot.“ [5]

Modul. index $\beta$	Amplitudy spektrálních čar									
	$U_0$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_7$	$U_8$	$U_9$
0	1,000									
0,05	0,999	0,025								
0,1	0,997	0,050								
0,2	0,990	0,099								
0,5	0,938	0,242	0,031							
1,0	0,765	0,440	0,115	0,019	0,002					
2,0	0,224	0,577	0,353	0,129	0,034	0,007				
3,0	-0,260	0,339	0,486	0,309	0,132	0,043	0,011			
4,0	-0,397	-0,066	0,364	0,430	0,281	0,132	0,049	0,015		
5,0	-0,177	-0,328	0,047	0,365	0,391	0,261	0,131	0,053	0,018	
6,0	0,150	-0,277	-0,243	0,115	0,358	0,362	0,246	0,130	0,056	0,021
7,0	0,300	-0,005	-0,304	-0,168	0,158	0,347	0,339	0,234	0,128	0,059
10,0	-0,246	0,043	0,255	0,058	-0,219	-0,234	-0,014	0,217	0,318	0,292

**Tabulka 3.3.2: Amplitudy spektrálních čar[4].**

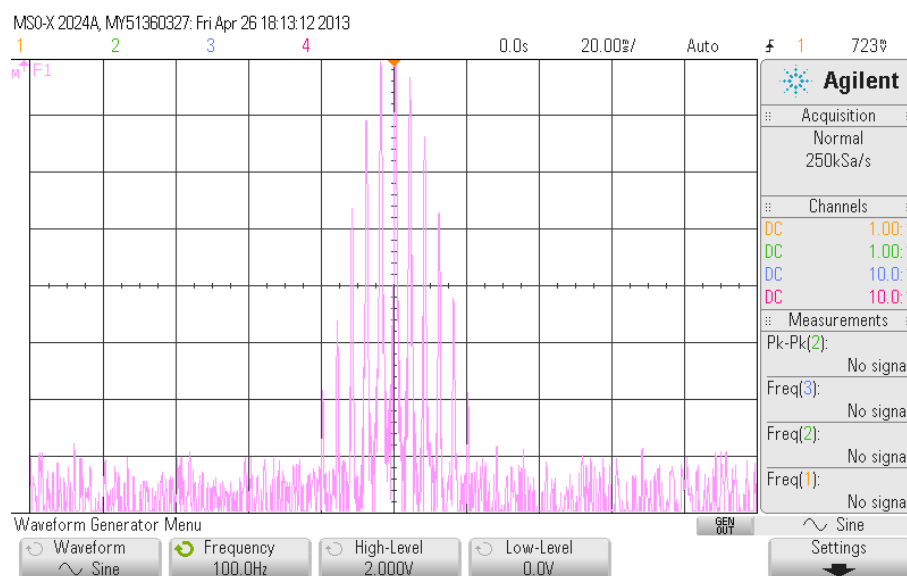
Díky tomuto zjištění je posléze možné sledovat, jak se bude měnit šířka pásma v závislosti na proměnlivém nastavování amplitudy modulačního signálu. Ovšem další vliv na šířku frekvenčního spektra má samotná frekvence modulačního signálu. Rozestupy jednotlivých složek spektra jsou děleny v závislosti na hodnotě frekvence modulačního signálu.

### 2.2.3 Naměřené výsledky

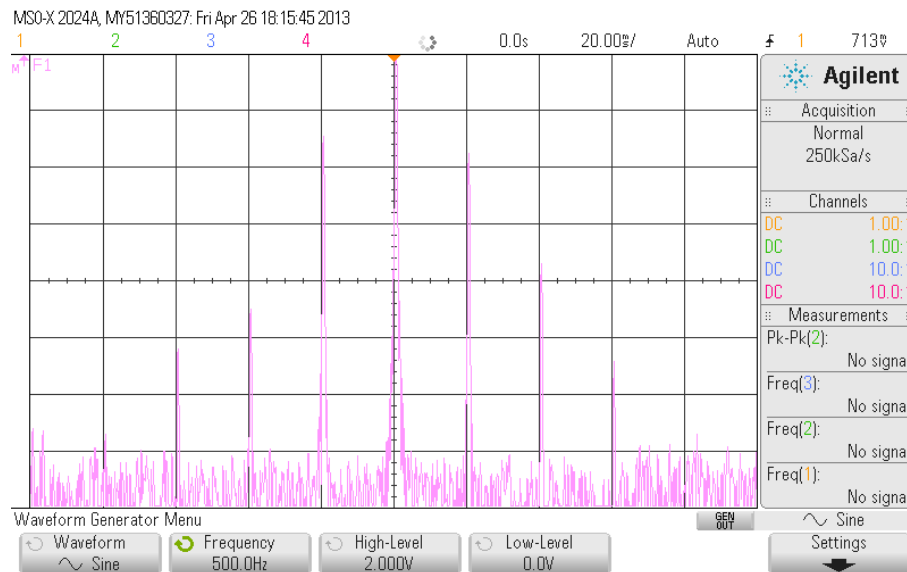
Zkouška FM modulátoru probíhala v laboratořích s laboratorními přístroji. K napájení byl použit zdroj Hadex EP – 613. Z něho bylo použito napájecí napětí 10V. Na vstup modulátoru byl přiveden modulační signál z integrovaného generátoru signálu v osciloskopu Agilent MSO-X2024A. Tento Osciloskop byl zároveň použit díky funkci „MATH“ jako spektrální analyzátor.

Tato funkce využívá FFT (*Fast Fourier Transform*) způsobu k nalezení frekvenčního spektra[9].

Frekvence modulačního signálu byla vybírána na základě reálně nosné frekvence, která byla změřena 7.2kHz, ačkoliv v testovacím programu Multisim byla hodnota nosné frekvence 10kHz. Frekvence modulačního signálu byla zvolena v rozsahu 100 až 700Hz a tvar byl po celou dobu měření sinusový. Jasným důkazem funkce FM modulátoru jsou naměřené výsledky spektru FM signálu. Na obrázku 3.8 je modulační frekvence 100Hz, tedy i rozestup postranních složek je oddělen 100Hz mezerou. Stejně to bude i s obrázkem 3.9, který na rozdíl od předchozího má vlivem zvýšení modulační frekvence 200Hz, zvětšený rozestup na 200Hz. U obou průběhů je centrální frekvence analyzátoru nastavena na 7,2kHz , a vodorovná osa frekvence má rozlišení 5kHz , tedy jeden dílek má 500Hz.5 postranních složek obrázku 3.8 s frekvencí  $f_m = 100\text{Hz}$  tedy přesně odpovídá šířce jednoho dílku.



**Obr. 3.8: Spektrum FM signálu při modulační frekvenci 100Hz.**



**Obr. 3.9: Spektrum FM signálu při modulační frekvenci 500Hz.**

Další naměřená spektra FM signálu s příslušným vyrobeným FM modulátorem jsou k vidění v příloze.

Podle obrázku 3. 8., je šířka pásma 1kHz. Z toho se vypočítá index  $\beta$  a zdvih (3.5)

Pro obrázek č. 3.8 frekvenčního spektra platí hodnoty:

$$B_v = 1\text{kHz}$$

$$U_m = 2\text{V}$$

$$f_c = 7200\text{Hz}$$

$$f_m = 100\text{Hz}$$

$$B_v = 2f_m \cdot (1 + \beta)$$

$$\Delta f = \frac{B_v}{2} - f_m = \frac{1000}{2} - 100 = 400\text{Hz}$$

$$k_{FM} = \frac{\Delta f}{U_m} = \frac{400}{2} = 200$$

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{400}{100} = 4$$

$$B_v = 2f_m \cdot (1 + \beta) = 200 \cdot (1 + 4) = 1000\text{Hz}$$

Podle vzorce se  $\beta=4$  a šířka pásma  $B = 1000\text{Hz}$ , což při nahlédnutí na naměřené průběhy, přesně odpovídá, pokud se vezme v úvahu, že rozlišení je 500Hz na dílek.

Pro obrázek č. 3.9 frekvenčního spektra platí hodnoty:

$$f_c = 7200\text{Hz}$$

$$f_m = 500\text{Hz}$$

$$U_m = 2\text{V}$$

$$B_v = 3\text{kHz}$$

$$B_v = 2f_m \cdot (1 + \beta)$$

$$\Delta f = \frac{B_v}{2} - f_m = \frac{3000}{2} - 500 = 1000\text{Hz}$$

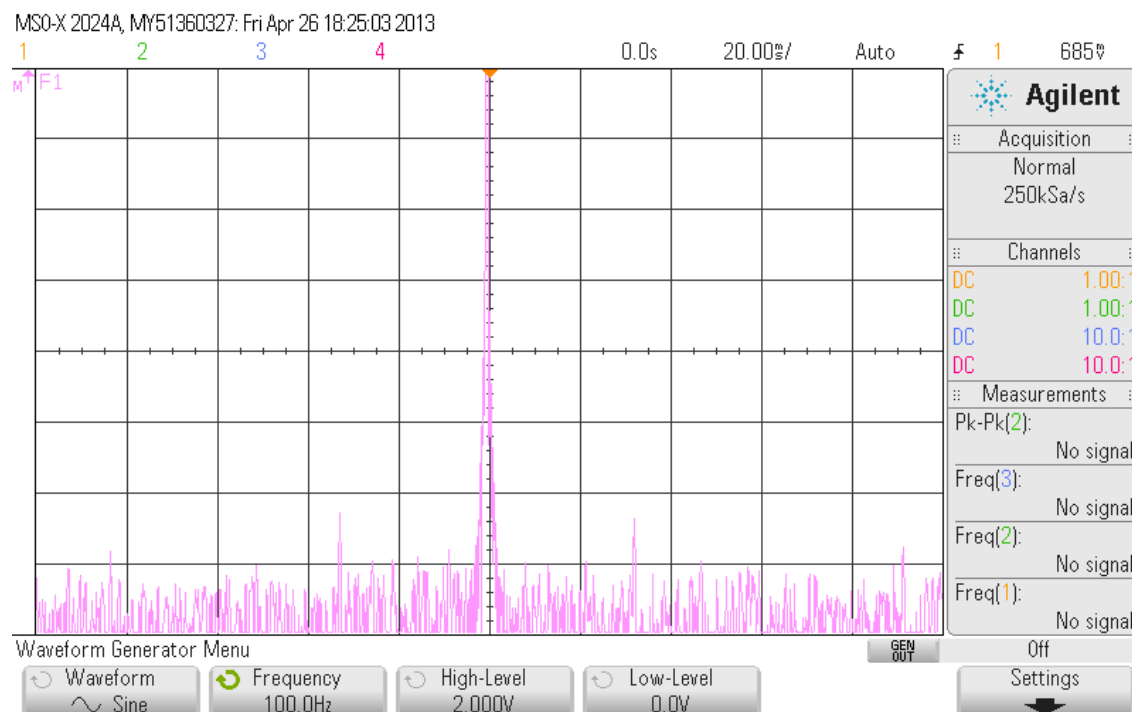
$$k_{FM} = \frac{\Delta f}{U_m} = \frac{1000}{2} = 500$$

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{1000}{500} = 2$$

$$B_v = 2f_m \cdot (1 + \beta) = 1000 \cdot (1 + 2) = 3000\text{Hz}$$

Podle vzorce se  $\beta=2,0$  a šířka pásma  $B = 3\,000\text{Hz}$ , a i to při pohledu na naměřené spektrum a přičtení toleranci součástek odpovídá.

Pro kontrolu výstupu lze modulovaný signál demodulovat, ovšem toto řešení není v zadání práce, proto ho ani konečný přípravek neobsahuje. Obrázek 3.10 vyobrazuje pouze, jak vypadá spektrum nosného signálu.



Obr. 3.10: Frekvenční spektrum nosného signálu.



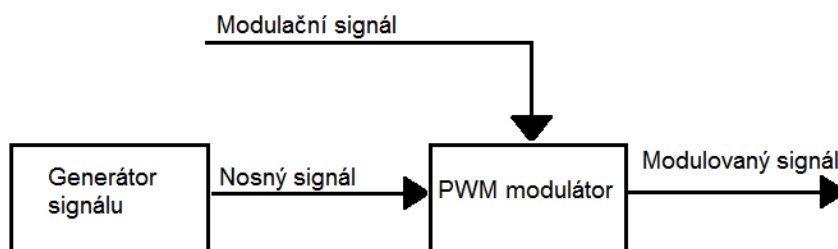
## 2.3 Modulátor PWM

Poslední návrh vychází z klasického učebnicového obvodu a spolu s inspirací v [5]. Oproti původní práci byla ponechána pouze kostra schématu, tedy operační zesilovače v jejich původních rolích, a doplněna o základní funkční bloky. Jako již výše zmíněné AM a FM modulátory, i tento slouží pro výukové účely v laboratorních podmínkách. Opět je to tedy deska plošných spojů, ke které byly přivedeny signály a napájecí napětí. A studenti, studující na elektrotechnické fakultě, si budou moci rámci laboratorní práce, vyzkoušet základní principy impulsní šířkové modulace. Na rozdíl od AM modulátoru, tento PWM modulátor má integrovaný generátor trojúhelníkového signálu, který slouží jako nosný. Na desku je tedy přiveden pouze modulační signál a napájecí napětí. Na rozdíl od předešlých přípravků disponuje tento modulátor možností změny vzorkovací frekvence nosného signálu, a tuto změnu bude možné sledovat na osciloskopu. Modulátor samotný je tedy variabilnější, než FM modulátor, ale méně variabilní, než AM modulátor, ve smyslu ovlivnění nosného signálu. Modulační signál se však přivádí z externího generátoru, a je tedy možno jej ovlivňovat a tím sledovat měnící se výstupní průběhy, opět pomocí již zmíněných vyhodnocovacích zařízení. Jelikož všechny vytvořené přípravky, včetně PWM modulátoru, budou sloužit v laboratorních podmínkách, byla provedena stejně jako u předchozích, standardizace součástek a komponentů desky plošných spojů. Opět byla použita rozlitá zem, na vstupy a výstupy použity BNC konektory k jednoduchému zapojení přípravku k měřicím přístrojům. Rovněž je zachováno napájecí napětí na 15V jako standart pro všechny přípravky. Samotná výroba desky plošných spojů byla provedena naprosto stejně jako v případě výše zmíněných modulátorů, a tedy byla vytvořena v laboratořích elektrotechnické fakulty. Byl použit naprosto stejný postup výroby, jen se změnila předloha na pauzovacím papíře (viz Příloha 6). Podle předlohy se upravila velikost desky. DPS byla standartním postupem vyrobena. Tedy osvětlena, ponořena v pozitivní vývojce a vyleptána leptadlem ( $\text{FeCl}_3$ ). Deska se poté osadila na základě schématu (příloha č. 8). Po osazení proběhla kontrola vodivosti jednotlivých drah a eliminovaly se zkratky, které mohou vzniknout nedokonalým vyleptáním nebo pájením. Dále se výrobek vyzkoušel, zdali předpisově funguje. Na základě ověření funkčnosti se stanovily správné podmínky pro správné používání, a byla vytvořena laboratorní úloha pro studenty, která je součástí této bakalářské práce. Instrukce a podmínky je nutné stanovit tak, aby nedošlo ke zničení přípravku nebo poškození přístrojů k přípravku připojených.

### 2.3.1 Blokové schéma

Impulsní šířkový modulátor je z hlediska obecného blokového schématu blízký jak amplitudovému, tak frekvenčnímu modulátoru. Na rozdíl od obou zmiňovaných, obsahuje jeden podstatný detail, a to integrovaný generátor signálu pilového průběhu s volitelnými frekvencemi, který představuje zdroj nosného signálu. Proto blokové schéma v tomto případě tvoří dva bloky a to samotný modulátor a již zmíněný generátor signálu. V blokovém schématu figuruje pouze jeden vstup, jím je modulační signál značený jako  $m(t)$ . Výstupem z bloku je modulovaný signál  $u_{PWM}(t)$ . Všechny vstupy a výstupy jsou standardizovány za pomoci BNC přípojného konektoru pro koaxiální kabel.

Jak již bylo řečeno, je zde možnost změny hodnot nosné frekvence za pomoci jednotlivého propojení zdírek svorkovnice. Díky propojení získá vstupní nosný signál v závislosti na propojené ohmické hodnotě různou frekvenci. Na výběr je možnost 8, 16, 32, 64kHz. Samotný generátor nosného signálu je zabudovaný na desce plošných spojů. Nicméně k otestování kvality postačí modulační signál.

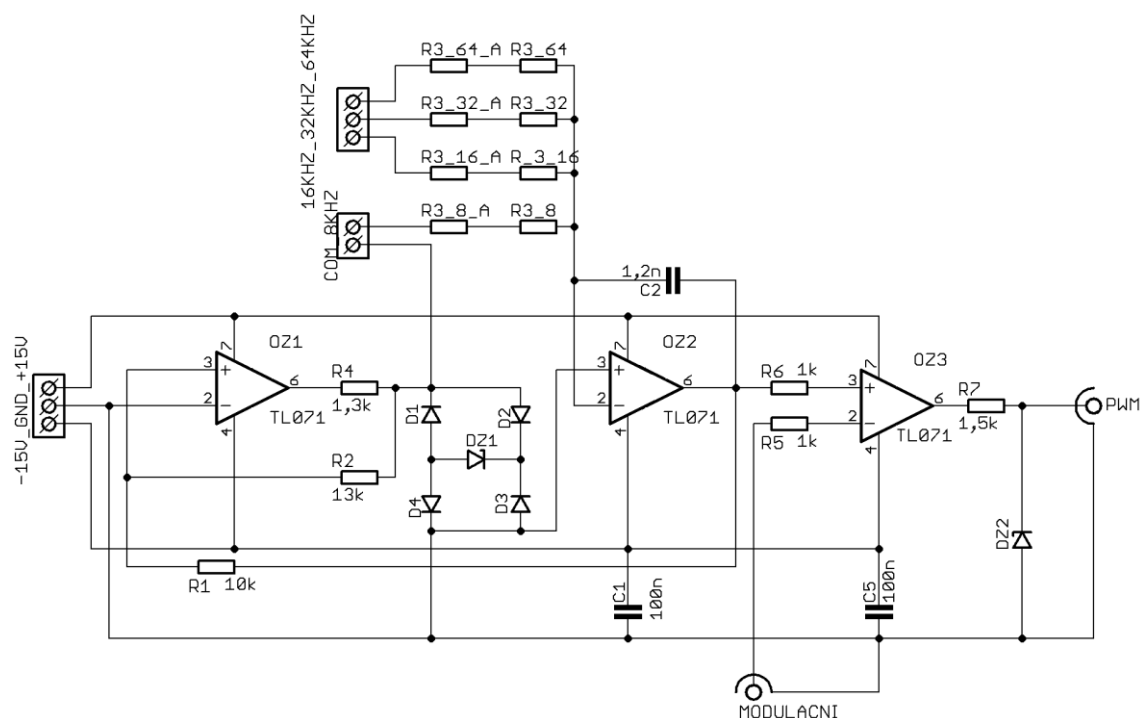


**Obr. 3.11: Blokové schéma PWM modulátoru.**

Impulsní šířkový modulátor je realizován pomocí integrovaných obvodů. Samotný generátor signálu je tvořen specificky zapojeným komparátorem (v podobě operačního zesilovače TL071), integrátorem (rovněž operační zesilovač TL071) a můstkovým omezovačem amplitudy. Specifickým zapojením komparátoru je myšleno zapojení tzv. Schmidťův klopný obvod. Tento obvod má za úkol převádět střídavý signál na obdélníkový a rovněž má kladnou zpětnou vazbu. Tento průběh je následně přiveden na invertující vstup integrátoru. Ten v zapojení s kondenzátorem na záporné zpětné vazbě převede vstupní obdélníkový signál na výstupní trojúhelníkový. Výsledkem je trojúhelníkový signál, jehož průběh má stabilní amplitudu bez záhybů nebo překmitů, a je vhodný k modulování sestupné i náběžné hrany.

### 2.3.2 Obvodové schéma

Obvodové schéma, výše zmíněné, pochází ze základního schématu. Inspirací diplomové práce byla do obvodového schématu zařazena možnost měnit vzorkovací frekvenci nosné.



**Obr. 3.12: Obvodové schéma impulsního šířkového modulátoru.**

K tomu, aby semohla měnit frekvence nosného signálu, musí se z konečného odporu R3 udělat proměnný. Místo potenciometru byly použity čtyři řady dvou odporů v sérii a za pomoci propojky a svorkovnic je možné je propojovat podle toho, zdali bude potřeba frekvence 8, 16, 32, 64kHz.

$$T = 4R_3C \frac{R_1}{R_2} \quad (3.8)$$

Kvůli tomu byly vypočteny hodnoty odporů pro každou frekvenci výše zmíněným vzorcem pro výpočet periody signálu. Jelikož však vypočtené ohmické hodnoty neodpovídaly standardizovaným hodnotám konvenčních rezistorů, bylo zapotřebí se k výsledku dostat co nejbližně zdvojením dvou rezistorů a zapojením do série. Hodnoty odporů a zvolené rezistory jsou v tabulce 3.3.1.

Vzorkovací frekvence [kHz]	Použitá hodnota R3 [ $\Omega$ ]	Použité rezistory
8	31250	33k $\Omega$ +2,7 $\Omega$
16	16430	16k $\Omega$ +430 $\Omega$
32	7310	6,8k $\Omega$ +510 $\Omega$
64	2291	2,2k $\Omega$ +91 $\Omega$

**Tabulka č. 3.3.1: rezistory vzorkovací frekvence.**

Jelikož se však jedná o konvenční rezistory, které mají procentuální toleranci 5%, odpovídá tomu i skutečná hodnota frekvence nosného signálu, která se v případě 8 kHz změnila na 8,20kHz, 16Khz je ve výsledku 16,40kHz. U 32kHz je výsledná skutečná frekvence 32.5kHz a místo 64kHz je na výstupu 64,3kHz. Nicméně pro laboratorní účely nejsou pro studenty tyto odchylky významné. Dále je třeba zajistit, aby se integrátor obdélníkového průběhu nedostal do saturace a byl včas překlopen. Toho je dosaženo zvolením správných ohmických hodnot odporu R1 a R2 podle podmínky:  $R1 < R2$ . Hodnoty těchto rezistorů se určuje podle následujícího vztahu.

$$\delta u = 2U_{sat} \frac{R1}{R2} \quad (3.9)$$

K výpočtu je však ještě třeba zjistit hodnoty mezivrcholového výstupního napětí  $\delta u$  a saturačního napětí  $U_{sat}$ . Mezivrcholové výstupní napětí  $\delta u$  je 2x5V, tedy ve výsledku 10V. Saturační napětí je omezeno můstkovým diodovým omezovačem a výsledek je 6,4V, které jsou na výstupu z diodového omezovače. To znamená, že stejnou hodnotu je třeba dosadit namísto  $U_{sat}$  a dopočítat odpor R2. Zprvu byl zvolen rezistor R1 na 10k $\Omega$ , a za pomoci výše uvedeného vzorce se dopočítal rezistor R2, jehož výsledná hodnota je 13k $\Omega$ .

V případě diodového můstkového omezovače jsou použity volně dostupné Zenerovy a Schotkyho diody BAT 41. Tento základní typ má v propustném směru úbytek napětí 400mV při 1mA podle dokumentace. Zenerova dioda byla zvolena typ BZX55/5V6 pro výkon do 0,5W.

Nosný signál je tedy po úpravě frekvence a můstkového omezovače vytvořen, a pokračuje na invertující vstup dalšího operačního zesilovače – integrátoru, který má za úkol tento signál upravit na trojúhelníkový průběh. Samotný zesilovač není nastaven externími součástkami, pouze obsahuje kondenzátor, připojený mezi výstup a invertující vstup pro plnění funkce integrátoru.

Následně je mezi napájení operačního zesilovače integrátoru vložen kondenzátor. Konkrétně se jedná o kondenzátor C1, který má hodnotu 100nF, slouží k potlačení rušivých vlivů signálů z napájecího zdroje. Napájení je realizováno laboratorním zdrojem, a jediné, co tento kondenzátor vykonává, je odfiltrování rušivých signálů ze sekundárního vinutí transformátoru zdroje.

Totéž platí i pro operační zesilovač OZ 3, který zastává funkci komparátoru: rovněž je opatřen tímto odrušovacím kondenzátorem.

Tento operační zesilovač je posledním aktivním prvkem modulátoru. Jak již bylo výše zmíněno, pracuje jako komparátor a to napětíový.

Napětíový komparátor je nelineární obvod, jenž slouží k porovnání dvou napětí. V tomto případě napětí signálu modulačního a nosného. Podle polarity rozdílu těchto napětí, nabývá výstupní napětí komparátoru jedné ze dvou hodnot, které se upraví na log. 0 a log. 1. Přejít mezi těmito hodnotami je prakticky skokový [9].

Na neinvertující vstup je přiveden nosný signál z generátoru signálu, a na invertující je pro změnu přivedený modulační. Komparátor tyto dva průběhy porovná stejně, jak bylo vysvětleno v teoretickém rozboru, viz Teorie PWM - modulace náběžné i sestupné hrany. Za komparátorem se nachází rezistor R7 a Zenerova dioda DZ2. Rezistor pracuje jako omezovač proudu procházejícího Zenerovou diodou. Výstup pro modulovaný signál je opatřen BNC konektorem, stejně jako vstup pro modulační signál.

### 2.3.3 Naměřené výsledky

Měření výsledků proběhlo v laboratoři s laboratorním zdrojem MASTECH – HY3005D-3, kde bylo využito dvou na sobě nezávislých volně nastavitelných výstupů napájení. Díky tomu byl zapojen napájecí obvod tak, aby byl schopen zásobovat operační zesilovače +15 a -15V. Zobrazovacím zařízením PWM signálu byl osciloskop. PWM signál byl připojen k prvnímu kanálu osciloskopu. K druhému kanálu byla přivedena sonda pro sledování modulačního signálu, protože samotný modulační vstup nemá body k připojení osciloskopu. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 8kHz a modulační signál byl zvolen sinusový s frekvencí 1kHz. Hodnota napětí 10.9V sinusového modulačního signálu je mylná, jelikož byl měřen sondou a u té byl špatně nastaven poměr 10:1. Správně by měl být 1:1.

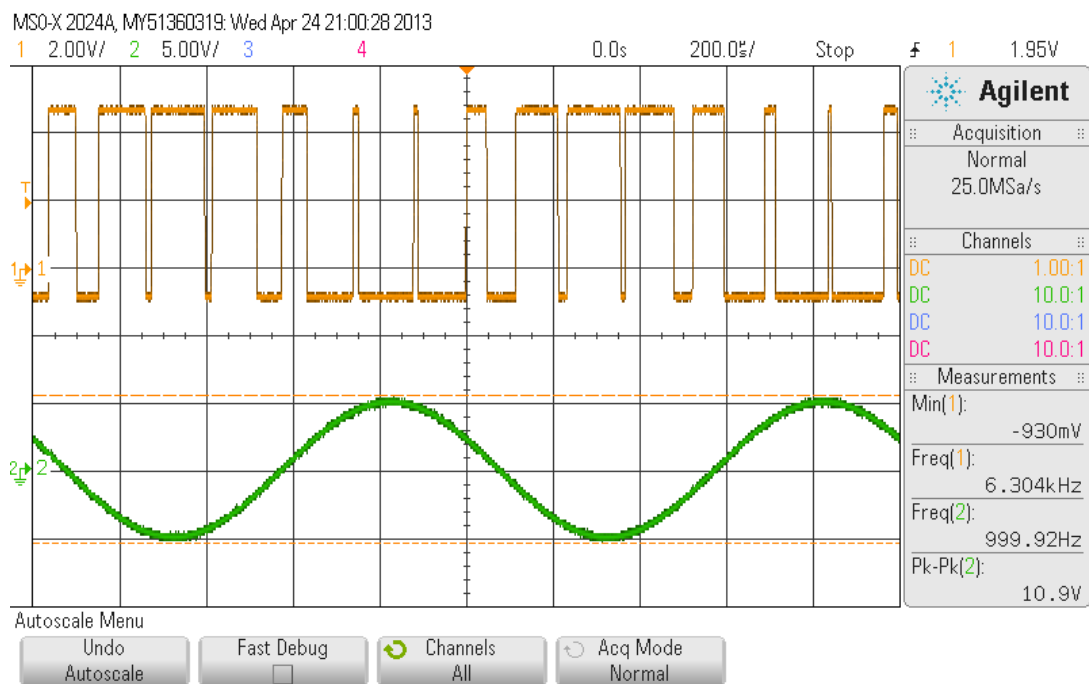
Obrázky níže znázorňují funkčnost modulace při různých vzorkovacích frekvencích. Další modulace lze najít na obrázcích níže uvedených a v příloze.

Pro obrázek č. 3.13 platí hodnoty vstupních veličin: $f_c = 8 \text{ kHz}$ $f_m = 1000 \text{ Hz}$  $U_m = 2,6 \text{ V}$	Pro obrázek č. 3.14 platí hodnoty: $f_c = 16 \text{ kHz}$ $f_m = 1000 \text{ Hz}$  $U_m = 2,6 \text{ V}$
---	--

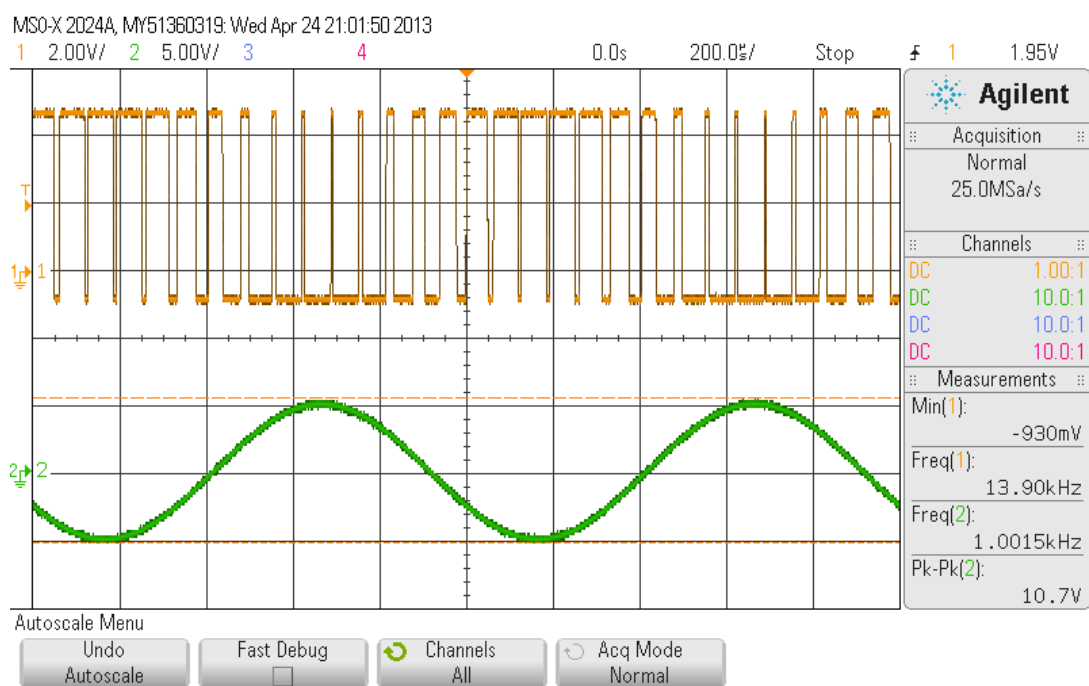
Z obrázku je jasně patrné, jak se změnila vzorkovací frekvence. Lze říci, že čím vyšší vzorkovací frekvence je použita, tím kvalitnější bude výsledný modulovaný signál, co se týče informací v něm obsažených. Tato funkce je velmi důležitá v případě použití vyšší modulační frekvence. Platí podmínka, že modulační frekvence by měla být alespoň 2x menší než frekvence vzorkovací. Díky zachování této podmínky lze modulaci považovat za kvalitní, bez ztráty důležitých informací uložených v modulačním signálu.

V této konkrétní realizaci je tedy při dodržení zmíněné podmínky možno použít modulační signál o kmitočtu 4kHz. U dalších nosných frekvencí je tento násobek stejný.

V případě nedodržení těchto podmínek hrozí ztráta informací modulačního signálu.



**Obr. 3.13: Ukázka modulace při vzorkovací frekvenci 8kHz.**



**Obr. 3.14: Ukázka modulace při vzorkovací frekvenci 16kHz.**

## 3 Laboratorní úloha

Samotná laboratorní úloha je koncipována v souladu s vyrobenými modulátory, a zajišťuje prověření principů jednotlivých modulací. Tyto principy přibližuje studentům, kteří tuto laboratorní úlohu budou posléze vykonávat.

U amplitudové modulace se úloha zaměřuje na možnost zjištění výsledného modulovaného signálu při nastavení vstupních signálů. Posléze se přikračuje k další části a to zjištění hloubky modulace a prozkoumání nevhodných stavů, tedy přemodulování. Odtud budou vycházet i početní úkony pro výpočet hloubky modulace a výpočty parametrů pro správné nastavení dané hloubky modulace, uvedené v samotné laboratorní úloze (Příloha č. 14). Všechny tyto kroky v zadání bude třeba zhodnotit v závěru protokolu z laboratorní úlohy.

Frekvenční modulátor podléhá v laboratorní úloze úkonům podobným. Opět zde bude jako první část zadání třeba nalézt frekvenci a amplitudu pro správnou modulaci. Nadále bude možnost prohlédnout si spektrum na spektrálním analyzátoru a při té příležitosti opět zadán početní příklad na šířku pásma modulace. V závěru protokolu musí studenti tyto výsledky opět zhodnotit.

U impulsní šířkové modulace se budou studenti zaměřovat na správnost nastavení modulačního signálu, a poté budou moci za pomoci propojek, a tím změny odporu  $R_3$ , měnit vzorkovací frekvenci integrovaného generátoru trojúhelníkového průběhu.

Laboratorní úloha je proveditelná pouze v laboratořích a se schválenými laboratorními přístroji za dozoru vyučujícího. V případě nedodržení podmínek stanovených výrobcem modulátoru, uvedených v laboratorní úloze, může dojít ke zničení těchto modulátorů nebo poškození přístrojů.

## 4 Závěr

Tato bakalářská práce je zaměřena na měření modulovaných signálů osciloskopem a spektrálním analyzátozem. K tomu bylo třeba sestavit přípravky, tedy modulátory, s jejichž pomocí budu moci modulované signály měřit. Jelikož však nebyl v zadání určen počet modulací, byly po dohodě s vedoucím bakalářské práce stanoveny tři běžné modulace. A to amplitudová, frekvenční a impulsní šířková. Impulsní šířková modulace vycházela z obecného zapojení generátoru trojúhelníkového signálu a komparátoru pro modulaci nosné frekvence modulační frekvencí. Inspirací diplomovou prací, která tuto problematiku řešila podstatně podrobněji, jsem převzal možnost měnit jinak pevně danou vzorkovací frekvenci nosného signálu. Dobrou zprávou je, že zkonstruovaný modulátor pracuje přesně podle teoretických předpokladů. Za zmínku stojí fakt, že podle toho, na jaké vstupy komparátoru připojíme modulační a nosný signál, tak takové bude polarizování výstupního signálu. V případě opačného zapojení by byly hodnoty také opačné, což ve výsledku nehraje roli. V případě amplitudového modulátoru vychází návrh z koncepčně starého schématu za použití dvou transformátorů a tranzistoru. Na rozdíl od práce, ze které jsem koncept přebíral, jsem modulátor oprostil od oscilátoru a nahradil jím vstup pro externí generátor signálů, který dovolí variabilnější použití. Rovněž jsem vynechal měřicí body pro sledování průběhů před modulací a demodulací, a zaměřil se pouze na modulaci. Rovněž jsem přepracoval napájení, a vstupní i výstupní část jsem osadil BNC konektory pro zkvalitnění práce s modulátorem a kvality signálu, co se týče odrušení od okolí, ačkoliv využití je pouze v laboratorních podmínkách. Tento systém pracuje bezchybně. Dokonce i tolerance součástek je na tak únosné hranici, že hloubka modulace odpovídá vstupním amplitudám přivedených signálů. Co se týče FM modulátoru, je u něj použita koncepce oscilátoru, který je rozladován reaktančním tranzistorem. V mém případě nebyl koncept nijak výrazně upraven. Změny, které jsem udělal, byly spíše pro snadnější obsluhu. Vstupy jsem opět osadil BNC konektory. Při realizaci jsem přepracoval frekvenci generátoru signálu na 5kHz namísto původních 10kHz. Bohužel tolerance použitých součástek rezonančního obvodu zvedla frekvenci nosného signálu na 7kHz. Napájecí napětí je 15V bylo ošetřeno napěťovým děličem, ten nakonec nebyl v reálném návrhu realizován, protože nebyl třeba. Výsledky měření naprosto potvrdily fakt, že jde o specifickou úzkopásmovou modulaci jedním periodickým signálem a z výpočtů výsledků měření lze opět vyvodit závěr, že modulace pracuje správně, ale je ovlivněna tolerancí součástek. Laboratorní úloha tedy díky provozuschopnosti všech modulátorů (až na technické nedokonalosti v důsledku tolerancí součástek), bude sloužit pro výuku principů modulace a k tomu jsou mnou zkonstruované modulátory zcela dostačující.



## Literatura

- [1] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. Praha: BEN, 2000. 653s. ISBN 80-86056-47-3.
- [2] Karas, Ondřej. *Počítačové zpracování signálů I - základní úvod* [Online] 200\*. [Citace: 18. 01 2013.] <<http://programujte.com/clanek/2008102400-pocitacove-zpracovani-signalu-i-zakladni-uvod/>>.
- [3] MATĚJŮ, Tomáš. Návrh amplitudového modulátoru a demodulátoru: Diplomová práce. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. 2010. 69s. 6 l. Libor Gajdošík
- [4] NACHTMANN, Michael. Návrh kmitočtového modulátoru a demodulátoru: Diplomová práce. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. 2010. 63s. 4 l. Libor Gajdošík
- [5] HOŠTIČKA, Miroslav. Návrh modulátoru a demodulátoru pro impulsní šířkovou modulaci: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. 2012. 38s. 6 l. Libor Gajdošík
- [6] *Frekvenční modulace - Encyklopedie fyziky*. [Online]. [Citace: 2. Květen 2013.] <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1390-frekvencni-modulace>>.
- [7] *Fázová modulace - ackoo - učební texty*. [Online]. [Citace: 2. Květen 2013.] <[http://www.ackoo.estranky.cz/clanky/fazova-modulace\\_-rozdil-mezi-farovou-a-frekvencni-modulaci.html](http://www.ackoo.estranky.cz/clanky/fazova-modulace_-rozdil-mezi-farovou-a-frekvencni-modulaci.html)>.
- [8] *Střída (elektronika) - Wikipedie - Otevřená encyklopedie* [Online]. [Citace: 2. Květen 2013.] <[http://cs.wikipedia.org/wiki/St%C5%99%C3%ADda\\_\(elektronika\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/St%C5%99%C3%ADda_(elektronika))>.
- [9] HAASZ, Vladimír. SEDLÁČEK, Miloš. *Elektrická měření - Přístroje a metody*. Praha: ČVUT, 2000. 327s. ISBN 80-01-01717-6.
- [10] LÁNÍČEK, Robert. *Elektronika - součástky, obvody, děje*. Praha: ČVUT, 2000. 327s. ISBN 80-01-01717-6.
- [11] VOBECKÝ, Jan. ZÁHLAVA, Vít. *Elektronika - součástky a obvody, principy a příklady*. Praha: GRADA, 2005. 3.vyd. 320s. ISBN 80-247-1241-5.
- [12] ABEL, Martin. *Plošné spoje se SMD, návrh a konstrukce*. Pardubice: Platan, 2000. 1.vyd. 218s. ISBN 80-902733-2-7.

## Seznam obrázků

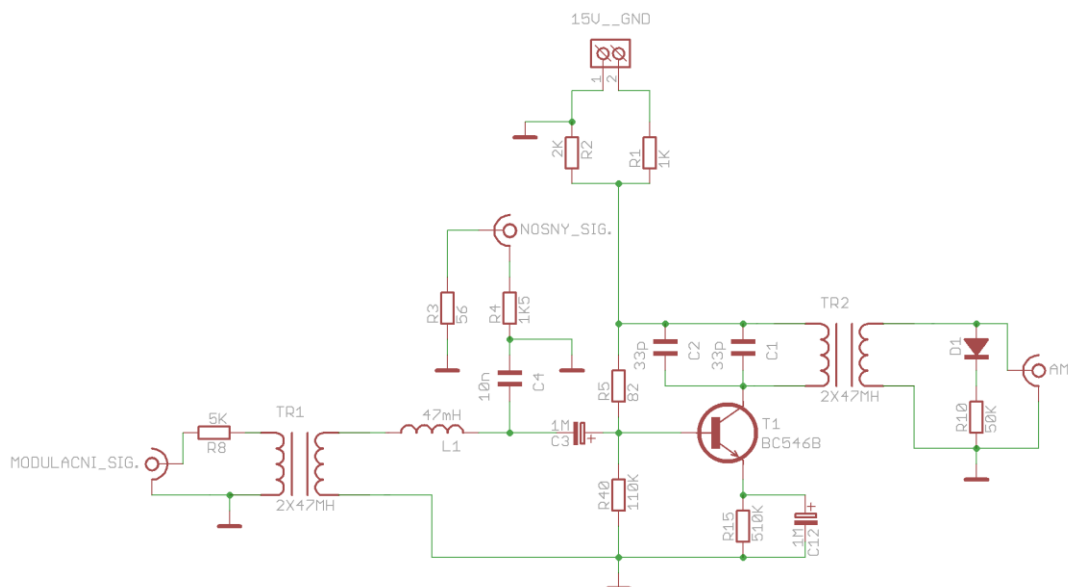
Obrázek 2.1: Analogový signál.....	3
Obrázek 2.2: Diskrétní signál.....	4
Obrázek 2.3: Radiokomunikační schéma.....	6
Obrázek 2.4: Hloubka amplitudové modulace.....	8
Obrázek 2.5: Frekvenční modulace.....	11
Obrázek 2.6: Vliv $\beta$ na šířku pásma.....	12
Obrázek 2.7: Fázová modulace.....	13
Obrázek 2.8: Časový průběh signálu a střídý.....	14
Obrázek 2.9: Základní blokové schéma PWM modulátoru.....	15
Obrázek 2.10: Modulovaná náběžná hrana.....	15
Obrázek 2.11: Modulovaná sestupná hrana.....	15
Obrázek 2.12: Modulovaná sestupná a náběžná hrana.....	16
Obrázek 3.1: Blokové schéma AM modulátoru.....	19
Obrázek 3.2: Navržené obvodové schéma.....	20
Obrázek 3.3: Výsledná amplitudová modulace s $m_a = 23\%$ .....	22
Obrázek 3.4: Výsledná amplitudová modulace s $m_a = 7\%$ .....	23
Obrázek 3.5: Frekvenční spektrum AM signálu.....	24
Obrázek 3.6: Blokové schéma FM modulátoru.....	25
Obrázek 3.7: Obvodové schéma navrženého FM modulátoru.....	26
Obrázek 3.8: Spektrum FM signálu při modulační frekvenci 100Hz.....	29
Obrázek 3.9: Spektrum FM signálu při modulační frekvenci 500Hz.....	30
Obrázek 3.10: Frekvenční spektrum nosného signálu.....	31
Obrázek 3.11: Blokové schéma PWM modulátoru.....	33
Obrázek 3.12: Obvodové schéma PWM modulátoru.....	34
Obrázek 3.13: Ukázka modulace při vzorkovací frekvenci 8kHz.....	37
Obrázek 3.14: Ukázka modulace při vzorkovací frekvenci 16kHz.....	37

# Seznam příloh

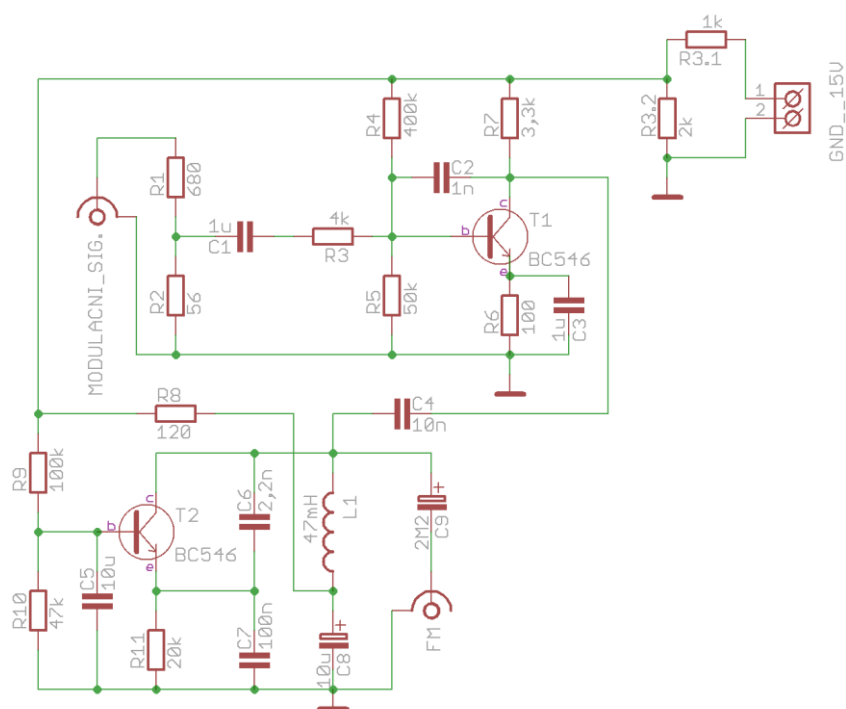
Příloha č. 1: Schéma zapojení AM modulátoru .....	II
Příloha č. 2: Schéma zapojení FM modulátoru .....	II
Příloha č. 3: Schéma zapojení PWM modulátoru .....	III
Příloha č. 4: DPS rozmístění součástek a strana plošných spojů AM modulátoru .....	III
Příloha č. 5: DPS rozmístění součástek a strana plošných spojů FM modulátoru .....	IV
Příloha č. 6: DPS rozmístění součástek a strana plošných spojů PWM modulátoru .....	IV
Příloha č. 7: Seznam součástek AM modulátoru .....	V
Příloha č. 8: Seznam součástek FM modulátoru .....	V
Příloha č. 9: Seznam součástek PWM modulátoru .....	VI
Příloha č. 10: Fotografie DPS AM modulátoru .....	VI
Příloha č. 11: Fotografie DPS FM modulátoru .....	VII
Příloha č. 12: Fotografie DPS PWM modulátoru .....	VII
Příloha č. 13: Seznam příloh na CD .....	VIII
Příloha č. 14: Zadání laboratorní úlohy .....	IX
Příloha č. 15: Vzorový protokol laboratorní úlohy .....	XV
Příloha č. 16: Naměřené výsledky AM modulátoru .....	XXIII
Příloha č. 17: Naměřené výsledky FM modulátoru .....	XXIV
Příloha č. 18: Naměřené výsledky PWM modulátoru .....	XXVI

# Přílohy

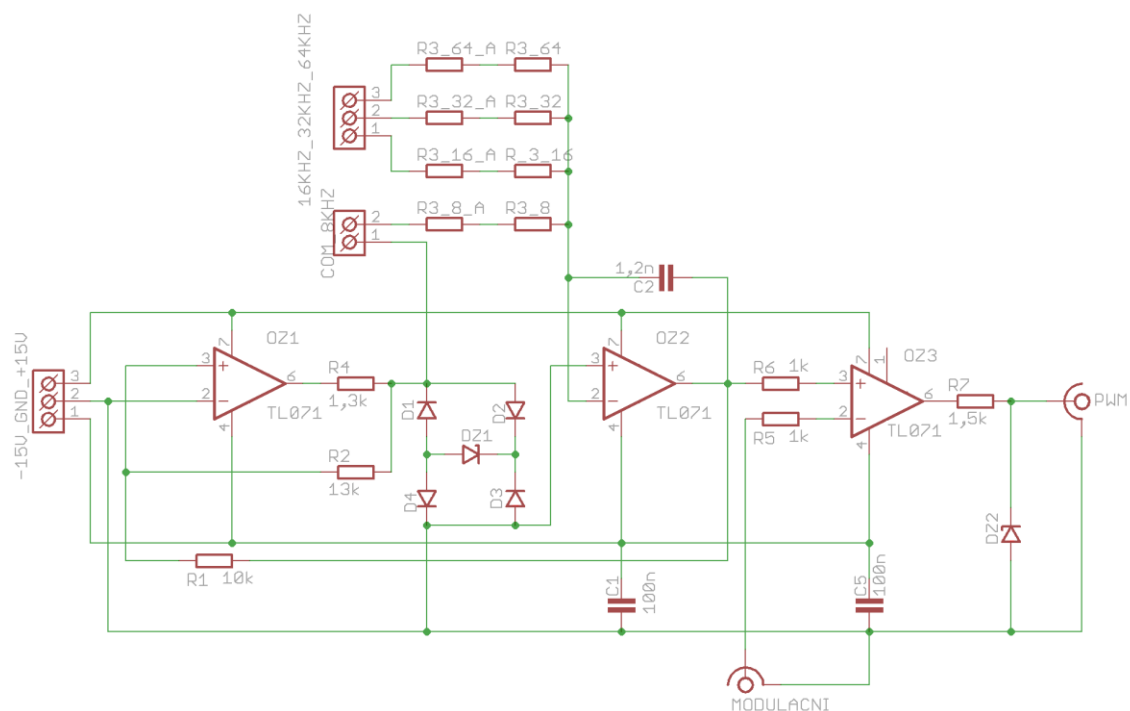
## Příloha č. 1: Schéma zapojení AM modulátoru.



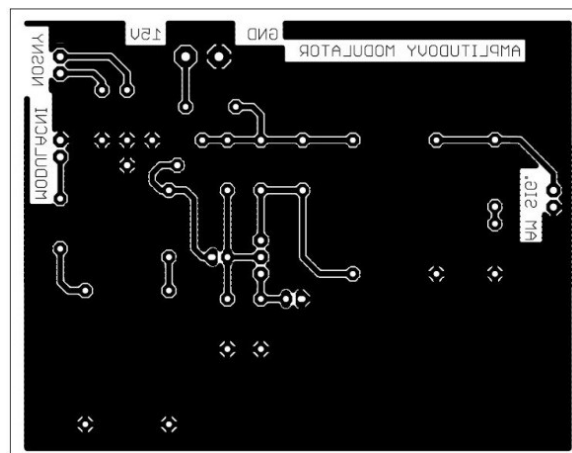
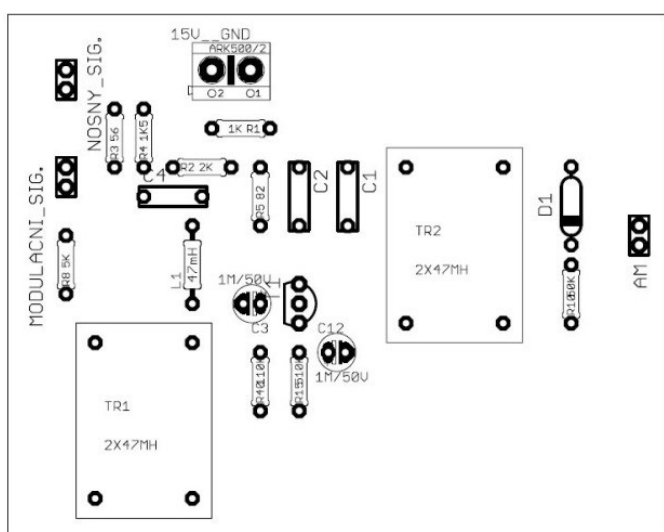
## Příloha č. 2: Schéma zapojení FM modulátoru.



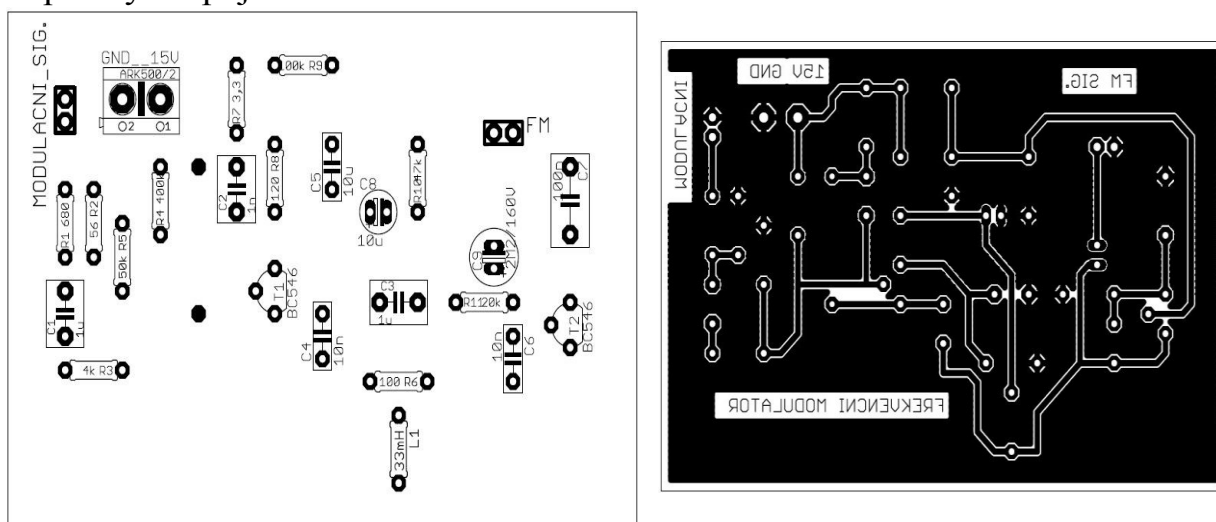
### Příloha č. 3: Schéma zapojení PWM modulátoru.



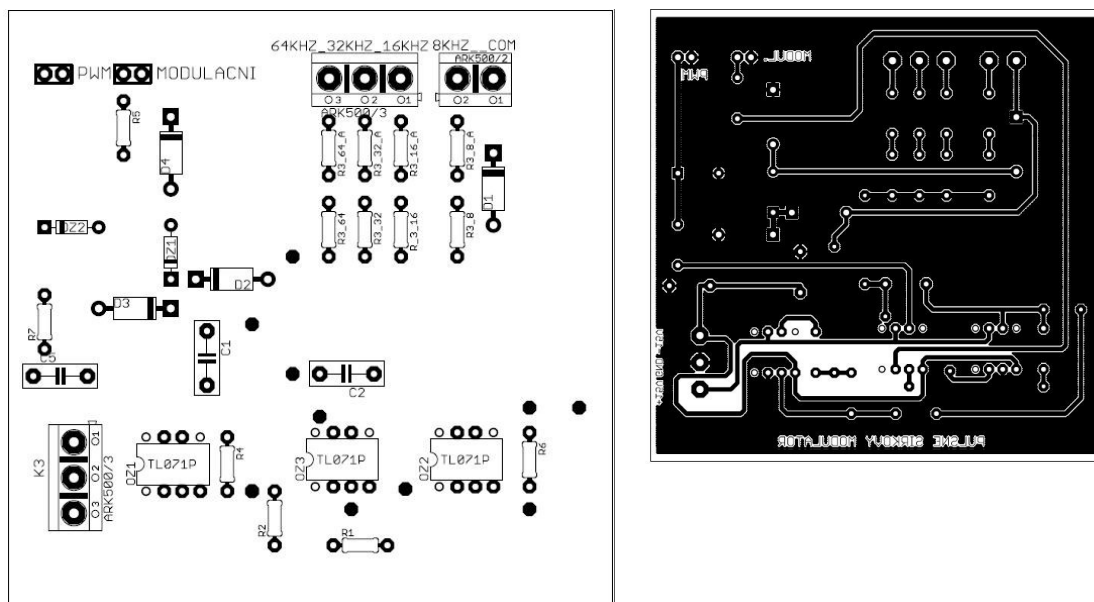
### Příloha č. 4: DPS rozmístění součástek AM modulátoru a DPS ze strany plošných spojů.



**Příloha č. 5:** DPS rozmístění součástek FM modulátoru a DPS ze strany plošných spojů.



**Příloha č. 6:** DPS rozmístění součástek PWM modulátoru DPS ze strany plošných spojů.



**Příloha č. 7: Seznam součástek AM modulátoru.**

Rezistory		Kondenzátory		Tlumivky		Diody	
R1	1k $\Omega$	C1	33pF	Tr1	2x47mH	D1	1N4067
R2	2k $\Omega$	C2	33pF	Tr2	2x47mH	Tranzistory	
R3	56 $\Omega$	C3	1 $\mu$ F	L1	47mH	T1	BC564A
R4	1,5k $\Omega$	C4	10nF				
R5	82 $\Omega$	C12	1 $\mu$ F				
R8	5k $\Omega$						
R10	50k $\Omega$						
R15	510k $\Omega$						
R40	110k $\Omega$						

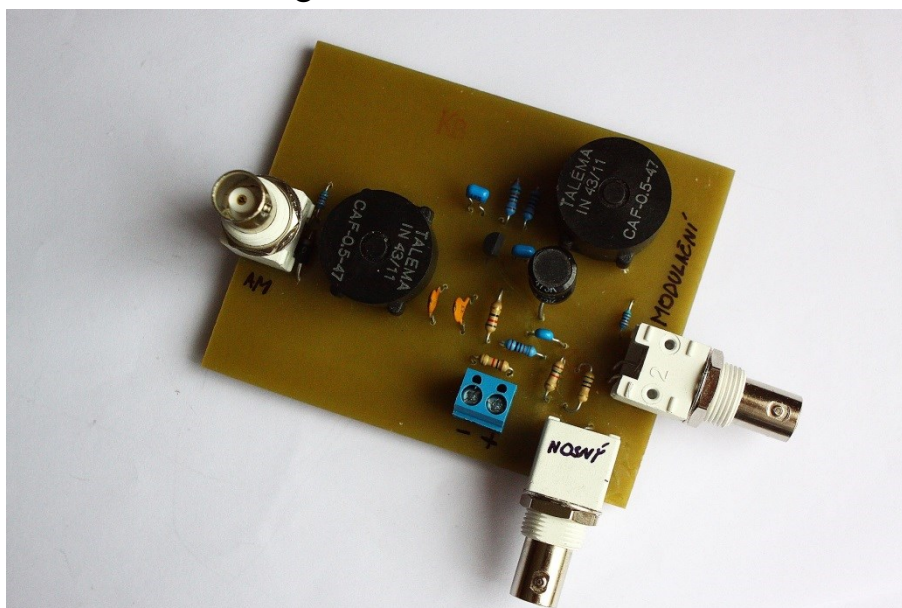
**Příloha č. 8: Seznam součástek FM modulátoru.**

Rezistory		Kondenzátory		Tlumivky	
R1	680 $\Omega$	C1	1 $\mu$ F	L1	47mH
R2	56 $\Omega$	C2	1 $\mu$ F	Tranzistory	
R3	4k $\Omega$	C3	1nF	T1	BC546B
R4	400k $\Omega$	C4	10nF	T2	BC546B
R5	50k $\Omega$	C5	10 $\mu$ F		
R6	100 $\Omega$	C6	2,2nF		
R7	3,3k $\Omega$	C7	100nF		
R8	120 $\Omega$	C8	10 $\mu$ F		
R9	100k $\Omega$	C9	2,2 $\mu$ F		
R10	47k $\Omega$				
R11	20k $\Omega$				

## Příloha č. 9: Seznam součástek PWM modulátoru.

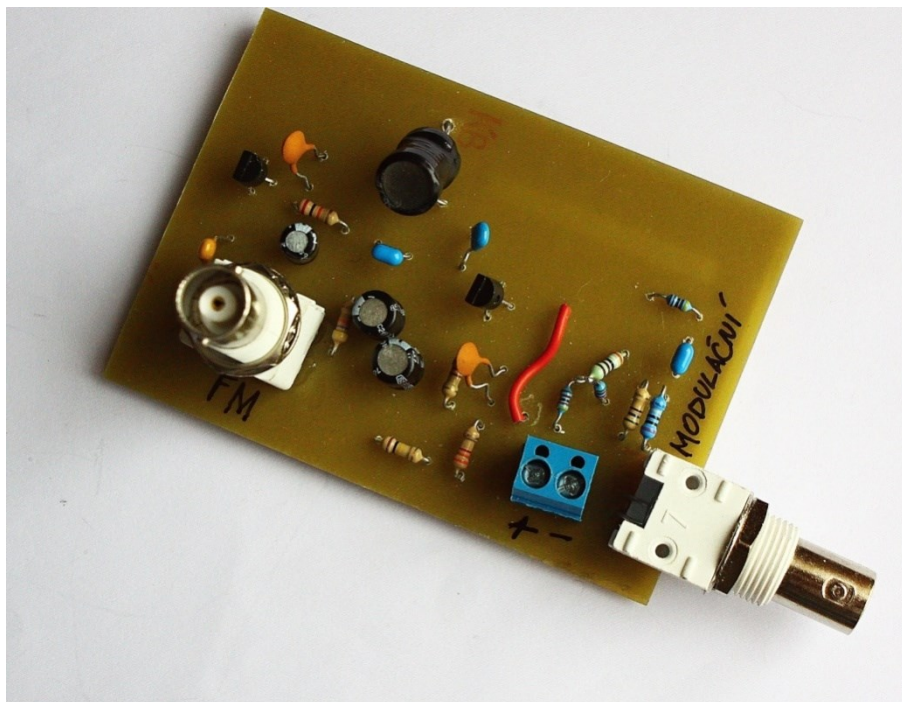
Rezistory		Kondenzátory		Operační zesilovače		Diody	
R1	10k $\Omega$	C1	100nF	OZ1	TL071	D1	BAT 41
R2	13k $\Omega$	C2	1,2nF	OZ2	TL071	D2	BAT 41
R3_8	33k $\Omega$	C5	100nF	OZ3	TL071	D3	BAT 41
R3_8_A	2,7k $\Omega$					D4	BAT 41
R3_16	430 $\Omega$					DZ1	BZX55
R3_16_A	16k $\Omega$					DZ2	BZX55
R3_32	6,8k $\Omega$						
R3_32_A	510 $\Omega$						
R3_64	91 $\Omega$						
R_64_A	2,2k $\Omega$						
R4	1,3k $\Omega$						
R5	1k $\Omega$						
R6	1k $\Omega$						
R7	1,5k $\Omega$						

## Příloha č. 10: Fotografie DPS AM modulátoru.

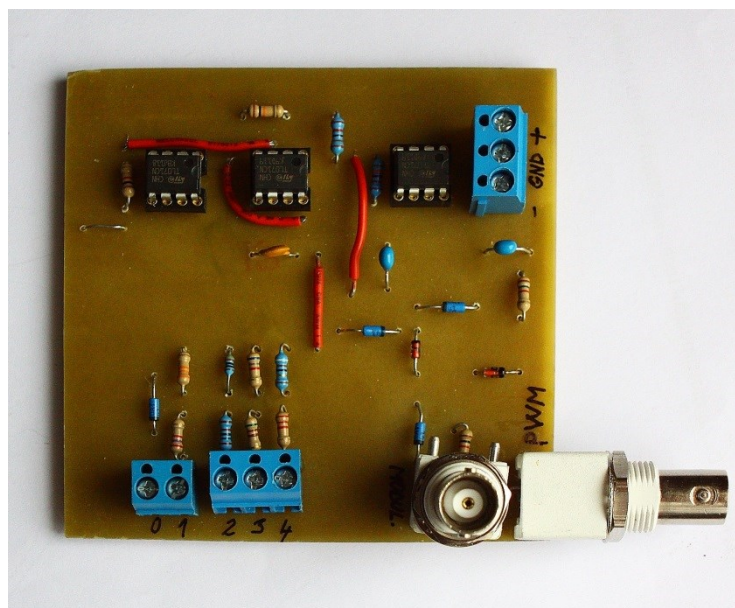




**Příloha č. 11:** Fotografie DPS FM modulátoru.



**Příloha č. 12:** Fotografie DPS PWM modulátoru.



### **Příloha č. 13: Seznam příloh na CD.**

- Bakalářská práce v PDF.
- Přílohy uvedené v tištěné verzi bakalářské práce.
- Fotografie testovaných obvodů na nepájivém poli.
- Soubory a fotografie testovaných obvodů v programu multisim.
- Soubory z programu Eagle.

## **Příloha 14:** Laboratorní úloha – zadání.

# Laboratorní úloha

## Měření modulovaných signálů osciloskopem a spektrálním analyzátozem

### 4.1 Cíl úlohy

Prostřednictvím této laboratorní úlohy se naučíte:

- Zásady modulace, jejich principy a vliv vstupních veličin na výsledný modulovaný signál
- Vyhodnotit průběhy modulací a posoudit jejich parametry
- Pracovat s osciloskopem a spektrálním analyzátozem v rámci sledování modulovaných signálů
- Chápat způsoby modulace a vysvětlit výhody a nevýhody

### 4.2 Zadání

1. Změřte a zakreslete průběhy modulovaných signálů AM na osciloskopu a spektrálním analyzátozu, a ze změřeného výsledku vypočítejte hloubku modulace
2. Změřte a zakreslete průběhy modulovaných signálů FM na spektrálním analyzátozu, ze změřeného výsledku vypočítejte index modulace  $\beta$ , šířku pásma  $B$ , a spočítejte rezonanční kmitočet.
3. Změřte a vykreslete vliv změny parametrů modulačního signálu a vzorkovací frekvence na výsledný modulovaný signál u PWM a uveďte důvody, k čemu je za potřeby, mít vyšší vzorkovací frekvenci oproti modulační frekvenci.
4. Vyhodnoťte, jaké faktory se podílí na celkové kvalitě modulovaného signálu.

## 4.3 Předpokládané znalosti

Pro tuto úlohu se vyžaduje nastudování:

- 5. Analýza signálů - elektrotechnika [ODKAZ]
- 7. Generátory - elektrotechnika [ODKAZ]
- 2. Modulace – Moderní radioelektronika [ODKAZ]

Zaměřte svoji pozornost na následující témata:

- Popis a analýza signálů
- Generátory a oscilátory, AM, FM, PWM modulace

## 4.4 Použité vybavení

- Spektrální analyzátor
- Osciloskop
- Generátor signálů
- Regulovatelný laboratorní zdroj 0-20V DC
- Přípravek – AM modulátor
- Přípravek – FM modulátor
- Přípravek – PWM modulátor

## 4.5 Teoretický rozbor

Elektrické signály a to jak napěťové tak proudové, které se mění v čase, můžeme vyjádřit jako funkci času. Analogové signály jsou spojité jak v čase, tak i v amplitudě. K lepší představě jako příklad výstupní signál mikrofону snímajícího hudbu. Analogový signál můžeme čistě teoreticky měřit v nekonečném rozlišení. Prakticky pouze do té míry, dokud nás nebude omezovat okolní šum. Diskrétní signály jsou naopak charakteristické určitým druhem nespojitosti. Pokud je signál charakteristický tím, že má nespojitost v okamžité hodnotě (amplitudě, která může být v rámci daného rozsahu libovolná) a zachovává si spojitost v čase, hovoříme o nespojitosti nekvantované. Existuje ale i kvantová nespojitost a to v případě, že amplituda může zaujímat pouze konečný počet diskrétních úrovní. Další skupinou jsou signály nespojité v čase, jinými slovy impulzové. Opět se můžou dělit na kvantované a nekvantované.

Bude-li se měnit amplituda napětí modulované nosné vlny lineárně s modulačním napětím, vznikne amplitudová modulace, ovšem za podmínky, že relativní fáze modulované nosné vlny vůči fázi nemodulované nosné vlny je konstantní. Amplitudová modulace je typický představitel lineární modulace, což je proces, při kterém dochází k pouhému frekvenčnímu posunutí spektra modulačního signálu. Modulovaný signál tak obsahuje pouze ty frekvenční složky, které odpovídají posunutým složkám modulačního signálu. Obálka AM signálu není konstantní a z toho důvodu se za modulátorem používají lineární výkonové zesilovače, pracující buď ve třídě

A anebo v dvojčinném zapojení ve třídě B; výkonová účinnost zesilovačů v tomto zapojení bývá nejvýše kolem 30 až 60%.

Hloubka modulace je znázorněna na obrázku 2.4.

Činitel amplitudové modulace musí taktéž splňovat dvě základní podmínky a to že  $m_a \geq 0$  a zároveň  $m_a \leq 1$ . Pokud se stane, že tyto podmínky nedodržíme, modulovaný signál bude zkreslený a to tzv. přemodulovaný, jak lze vidět na obrázku 2.4c.

$$m_a = \frac{U_m}{U_c} \quad (2.4)$$

V případě že činitel amplitudové modulace bude roven 1, v procentuálním výsledku 100%, znamená to, že je dosaženo maximálního stupně modulace jak je vidět na obrázku 2.4b. Obrázek 2.4a nám ukazuje případ, kdy by se činitel  $m_a$  rovnal 0,5. Respektive  $m_a = 0,5 = 50\%$

Frekvenční modulace patří spolu s fázovou do kategorie úhlových modulací, protože se u nich modulačním signálem mění fázový úhel nosné vlny. Amplituda nosné vlny na rozdíl od AM zůstává zachována. U kmitočtové modulace se okamžitý kmitočet  $f_i$  modulovaného signálu rovná součtu konstantního kmitočtu  $f_c$  nemodulované nosné vlny a časově proměnné složky (relativní kmitočtové odchylky), přímo úměrné modulačnímu napětí  $m(t)$ .

U širokopásmových modulací používáme k určení šířky index  $\beta$ . Ten by měl být mnohonásobně větší jak 1. Pracujeme s jedním spektrem signálů s kmitočtovou modulací, při jediném harmonickém modulačním signálu o kmitočtu a při indexech modulace  $\beta=0,2$ ;  $\beta=0,5$ ;  $\beta=1,0$ ; dosahovaných změnou modulačního napětí při konstantním kmitočtu. Liché složky dolního postranního pásma mají opačnou fázi vůči složkám horního pásma, což můžeme v daném zobrazení respektovat tak, že se jim přiřadí „negativní“ amplitudy. Na tomto obrázku jsou však pro jednoduchost tyto fázové relace zanedbány.

pulsní šířková modulace neboli zkráceně PWM (Pulse Width Modulation) patří mezi diskrétní modulace a to nekvantované. Zároveň s touto modulací se setkáváme s novým pojmem a to střídou. Střída je definovaná jako poměr časů, ve kterých je signál v jednotlivých úrovních. Pokud se uvádí střída ve tvaru např. 1:1 (50%), je tím myšleno, že obě dvě úrovně signálu trvají stejně dlouho. Pokud je střída udána v procentech, myslí se tím obvykle doba trvání úrovně „zapnuto“ vůči celkové periodě signálu. (0% až 100%, 50% pro 1:1). V případě hodnoty 100% se rozumí na výstupu logickou jedničku a hodnota 0% je projev na výstupu jako logická 0. Z toho vyplývá i omezení přenosu a to 0-100%. To ale znamená znalost parametrů vstupního modulačního signálu, abychom zabránili přemodulování nebo nedostatečného využití a malé změny střídý. Výpočet střídý je následující (2.14):

$$D = \frac{t}{T} \quad ; \text{ kde } t \text{ je délka pulzu a } T \text{ je délka periody} \quad (2.14)$$

## 4.6 Pracovní postup

### Postup k bodu č.1 zadání

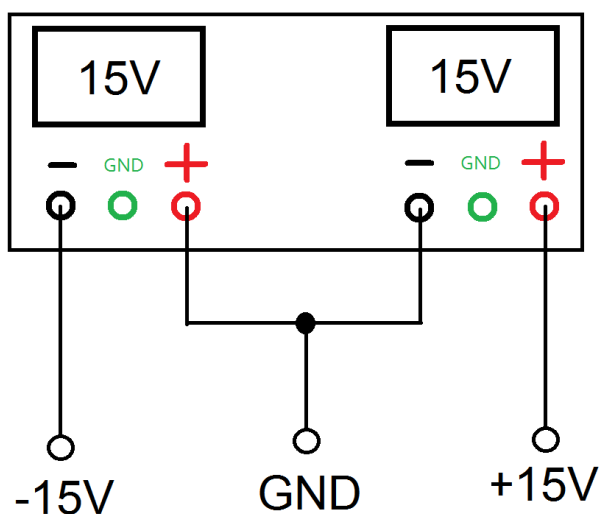
- 1.) Vezměte přípravek AM modulátoru a zapojte ho podle následujících instrukcí:
  - a.) Připojte na BNC konektor (AM Sig.) výstupu koaxiální kabel a zapojte ho do vstupu osciloskopu.
  - b.) Z výstupu generátoru (součást osciloskopu Agilent) ved'te kabel na BNC vstup nosný signál (označený jako NOSNY).
  - c.) Externí generátor připojte na vstup modulačního signálu (MODULACNI).
  - d.) Stejnoseměrný stabilizovaný zdroj přiveďte na svorky napájení modulátoru. Zvolte napájení 10 – 15V. Na 15V přiveďte kladný pól a na GND přiveďte záporný pól.
- 2.) Na generátoru, který je obsažen v osciloskopu nastavte parametry pro nosný signál: tzn.  $f=100\text{kHz}$  a amplituda je 3,5V.
- 3.) Na externím generátoru, který slouží pro vytvoření modulačního signálu, nastavte amplitudu na 1V a modulační frekvenci na 1 nebo 2kHz.
- 4.) Na osciloskopu zmáčkněte AUTO-SCALE a následně vylad'te průběh tak, aby byl jasně viditelný průběh modulace.
- 5.) Potom si průběh modulace uložte jako PNG. Soubor a to samé udělejte pro amplitudu modulačního signálu 100mV, 250mV, 500mV a 1V. Z těchto průběhů následně vypočítejte hloubku modulace.
- 6.) Potom přepněte na osciloskopu funkci spektrálního analyzátoru (Math) a nastavte centrální frekvenci 100kHz a SPAN na 500kHz. Měňte frekvenci modulačního signálu do takové úrovně (zhruba kolem 60kHz), abyste viděli jednu centrální nosnou frekvenci a dvě postranní složky, tento průběh si zaznamenejte a v protokolu slovně okomentujte.

### Postup k bodu č.2 zadání

- 1.) Vezměte Přípravek FM modulátoru a zapojte ho podle následujících instrukcí:
  - a.) Připojte na BNC konektor (FM Sig.) výstupu koaxiální kabel a zapojte ho do vstupu osciloskopu.
  - b.) Z výstupu generátoru (součást osciloskopu Agilent) ved'te kabel na BNC vstup modulační signál (označený jako MODULACNI).
  - c.) Stejnoseměrný stabilizovaný zdroj přiveďte na svorky napájení modulátoru. Zvolte napájení 10 – 15V. na 15V přiveďte kladný pól a na GND přiveďte záporný pól.
- 2.) Na generátoru, který je obsažen v osciloskopu nastavte parametry pro modulační signál: tzn.  $f=100\text{Hz}$  a amplituda je 2V.
- 3.) Potom přepněte na osciloskopu funkci spektrálního analyzátoru (Math) a nastavte centrální frekvenci 7kHz a SPAN na 5kHz. Měňte frekvenci modulačního signálu v rozsahu od 100Hz do 700Hz a všechny výsledky si ukládejte jako PNG.
- 4.) Zapište si hodnoty modulačního a nosného signálu a z nich vypočítejte ke každému průběhu index  $\beta$  a šířku modulace. Tu porovnejte s naměřenými výsledky

## Postup k bodu č.3 zadání

- 1.) Vezměte Přípravek PWM modulátoru a zapojte ho podle následujících instrukcí:
  - a.) Připojte na BNC konektor (PWM) výstupu koaxiální kabel a zapojte ho do vstupu osciloskopu.
  - b.) Z výstupu generátoru (součást osciloskopu Agilent) ved'te kabel na BNC vstup modulačního signálu (označený jako MODUL.).
  - c.) Externí generátor připojte na vstup modulačního signálu (MODULACNI).
- 2.) Stejnosměrný stabilizovaný zdroj zapojte podle obrázku a připojte ho k modulátoru



Obr. 1: Zapojení stabilizovaného zdroje pro PWM modulátor.

- 3.) Na generátoru, který je obsažen v osciloskopu, nastavte parametry pro modulační signál: tzn.  $f=1\text{kHz}$  a amplituda je 2V.
- 4.) V místě, kde je tři a dvou pinová svorkovnice určuje propojením vzorkovací frekvenci. Tím, že propojíte nulu s číslem 1, dosáhnete vzorkovací frekvenci 8kHz. 0 + 2 je 16kHz. 0 + 3 je 32kHz a 0 + 4 je 64kHz.
- 5.) Na osciloskopu zmáčkněte AUTO-SCALE a následně vylad'te průběh tak, aby byl jasně viditelný průběh PWM modulace.
- 6.) Modulační frekvenci neměňte, pouze propojkou měňte vzorkovací frekvenci a dosažené průběhy si ukládejte jako PNG. Soubory. Tyto obrázky ohodno'te a vysvětlíte k čemu je důležitá vzorkovací frekvence, jak se projevuje a jaký vliv mám na informaci obsaženou v modulačním signálu.

## 4.7 Výsledky

Zakreslete všechny dosažené výsledky.

Vypočtete ze tří průběhů hloubku AM modulace

Vypočtete ze tří průběhů šířku pásma FM modulace a modulační index  $\beta$  a rezonanční frekvenci, když jsou použity součástky:  $L=47\text{mH}$ ,  $C_1=100\text{nF}$ ,  $C_2=4,7\text{nF}$ . Pozn.  $C_1$  a  $C_2$  jsou v sériovém zapojení.

Okomentujete jaký vliv má vzorkovací frekvence nosného signálu PWM a k čemu je důležitá.

## 4.8 Kontrolní otázky

1. Vysvětlete princip AM modulace
2. Vysvětlete princip FM modulace
3. Vysvětlete princip PWM modulace
5. Je pro praktickou realizaci telekomunikací lepší použít AM nebo FM modulaci?
7. Co je to nosná frekvence
8. Co je to modulační signál
9. Co je to modulovaný signál
10. Co znamená zdvih u FM modulace
11. Co znamená u PWM modulace střída?
12. Jaký vliv má vzorkovací frekvence na výsledný modulovaný PWM signál.
13. Jak ovlivňuje vyšší frekvence nosného signálu výsledný modulovaný signál?



**Příloha 15:** Laboratorní úloha – vzorový protokol.

VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

# **Protokol o měření**

## **Měření modulovaných signálů osci- loskopem a spektrálním analyzáto- rem**

Adam Šinčl, SIN0025

25.4.2013

## 4.1 Použité vybavení

- Laboratorní zdroj, typ Diametral L240R51D, sériové číslo: 300
- Přípravek AM modulátor
- Přípravek FM modulátor
- Přípravek PWM modulátor
- Generátor signálů Tektronix
- Osciloskop Agilent MSO-X 2024A

## 4.2 Popis měření

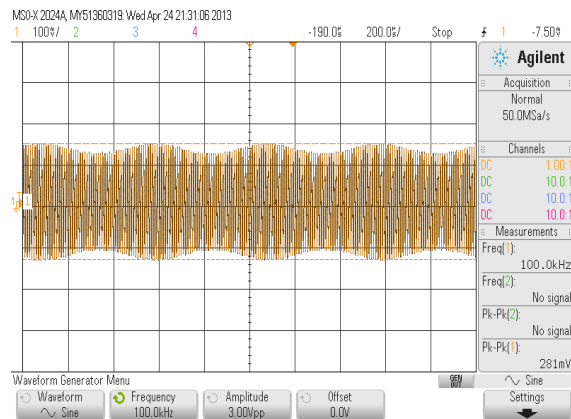
Po celou dobu měření jsme se řídili zadáním a postupovali jsme jednotlivě podle stanovených bodů zadání. V prvním bodě jsme zapojili přípravek AM modulátoru a nastavili hodnoty tak, aby se nám jasně zobrazil průběh modulace. Frekvenci modulačního signálu jsme nastavili na stálých 2kHz a měnili jsme amplitudu signálu. Zobrazené výsledky pak mají amplitudu 100mV, 250mV, 500mV a 1V. Následně jsme přenastavili osciloskop do režimu spektrálního analyzátoru a centrální frekvenci analyzátoru jsme nastavili na kmitočet nosné frekvence. Modulační frekvenci jsme pro lepší zobrazení postranní složky nastavili na 60kHz a tím zjistili, že AM modulace má pouze jednu postranní složku. Spektrum jsme zaznamenali.

V druhém bodě jsme připojili podle zadání FM modulátor, osciloskop jsme přenastavili do módu spektrální analyzátor, nastavili na něm centrální frekvenci 7kHz a jako modulační signál jsme použili sinusový průběh o frekvenci 100Hz s amplitudou 2V. Span na analyzátoru jsme nastavili na 5kHz, abychom viděli celou šířku spektra. Frekvenci modulačního signálu jsme posléze měnili od 100 do 700Hz a pozorovali jsme změnu šířky spektra.

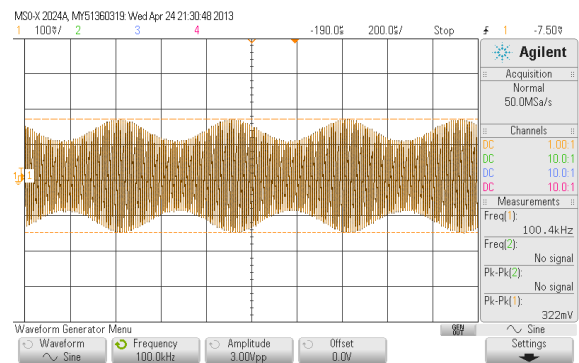
V posledním bodě zadání jsme měřili průběhy PWM modulace. PWM modulátor jsme zapojili dle instrukcí a svorku 0 propojili se svorkou 1, čímž jsme dosáhli vzorkovací frekvence nosného signálu 8kHz. změřili jsme na osciloskopu průběh a přenastavili vzorkovací frekvenci na 16kHz, potom na 32kHz a nakonec na 64kHz, všechny průběhy jsme zaznamenali a uložili.

## 4.3 Výsledky měření

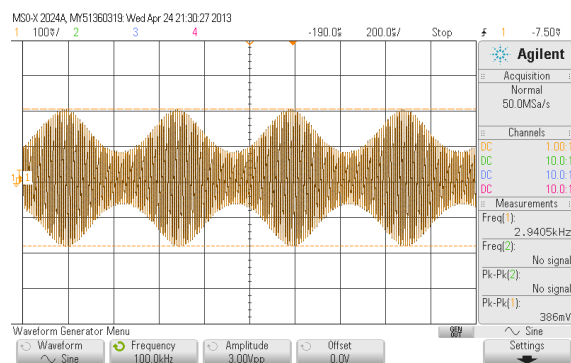
### 4.3.1 K bodu zadání 1



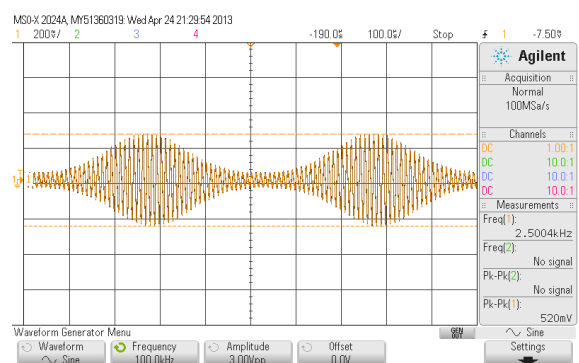
Obr. 1: AM modulace –  $U_m=100\text{mV}$ .



Obr. 2: AM modulace  $U_m=250\text{mV}$ .



Obr. 3: AM modulace –  $U_m=500\text{mV}$ .



Obr. 4: AM modulace –  $U_m=1\text{V}$ .

- Z obrázku 1 se vypočítá hloubka modulace:

$$ma = \frac{(0,14 - 0,12)}{(0,14 + 0,12)} = 0,07 \cdot 100 = 7\%$$

Hloubka modulace vychází 7%

- Z obrázku 2 se vypočítá hloubka modulace:

$$ma = \frac{(0,16 - 0,1)}{(0,16 + 0,1)} = 0,23 \cdot 100 = 23\%$$

Hloubka modulace vychází 23%

- Z obrázku 3 se vypočítá hloubka modulace:

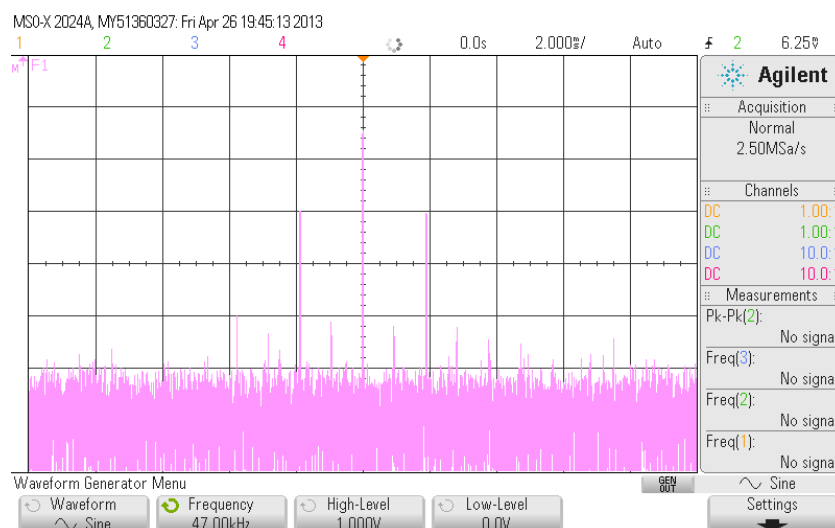
$$ma = \frac{(0,20 - 0,08)}{(0,20 + 0,08)} = 0,43 \cdot 100 = 43\%$$

Hloubka modulace vychází 43%

- Z obrázku 3 se vypočítá hloubka modulace:

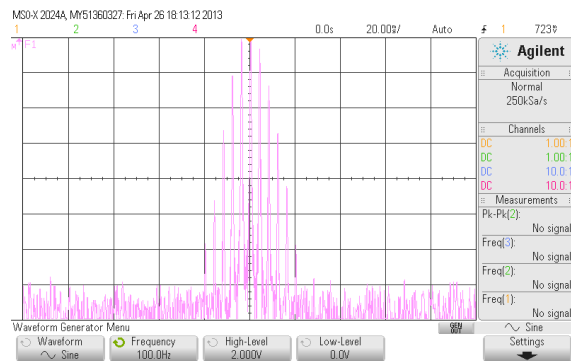
$$ma = \frac{(0,24 - 0,04)}{(0,24 + 0,04)} = 0,71 \cdot 100 = 71\%$$

Hloubka modulace vychází 43%

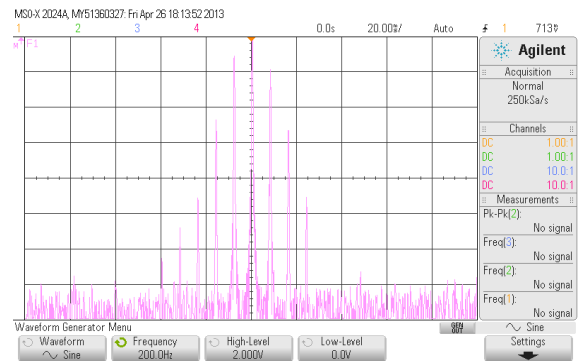


Obr. 5: Frekvenční spektrum AM modulace.

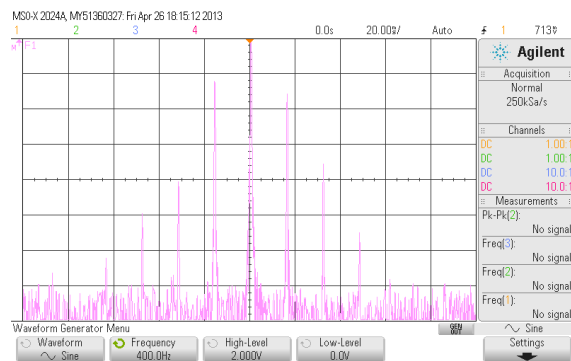
### 4.3.2 K bodu zadání 2



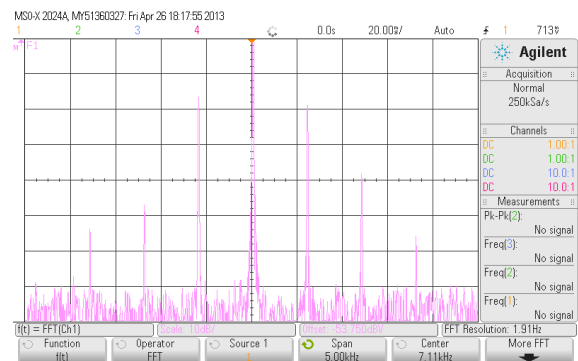
Obr. 6: Frekvenční spektrum FM  $f_m=100\text{Hz}$ .



Obr. 7: Frek. spektrum FM  $f_m=200\text{Hz}$ .



Obr. 8: Frekvenční spektrum FM  $f_m=400\text{Hz}$ .



Obr. 9: Frek. spektrum FM  $f_m=600\text{Hz}$ .

- Z obrázku 6 se vypočítá šířka modulace a modulační index  $\beta$ :  
 $f_m = 100\text{Hz}$ ,  $U_m = 2\text{V}$ ,  $B_v = 1000\text{Hz}$

$$\Delta f = \frac{B_v}{2} - f_m = \frac{1000}{2} - 100 = 400\text{Hz}$$

$$k_{FM} = \frac{\Delta f}{U_m} = \frac{400}{2} = 200$$

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{400}{100} = 4$$

$$B_v = 2f_m \cdot (1 + \beta) = 200 \cdot (1 + 4) = 1000\text{Hz}$$

- Z obrázku 7 se vypočítá šířka modulace a modulační index  $\beta$ :

$$f_m = 200\text{Hz}, U_m = 2\text{V}, B_v = 1600\text{Hz}$$

$$\Delta f = \frac{B_v}{2} - f_m = \frac{1600}{2} - 200 = 600\text{Hz}$$

$$k_{FM} = \frac{\Delta f}{U_m} = \frac{600}{2} = 300$$

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{600}{200} = 3$$

$$B_v = 2f_m \cdot (1 + \beta) = 400 \cdot (1 + 3) = 1600\text{Hz}$$

- Z obrázku 8 se vypočítá šířka modulace a modulační index  $\beta$ :  
 $f_m = 400\text{Hz}, B_v = 2800\text{Hz}, U_m = 2\text{V}$

$$\Delta f = \frac{B_v}{2} - f_m = \frac{2800}{2} - 400 = 1000\text{Hz}$$

$$k_{FM} = \frac{\Delta f}{U_m} = \frac{1000}{2} = 500$$

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{1000}{400} = 2,5$$

$$B_v = 2f_m \cdot (1 + \beta) = 800 \cdot (1 + 2,5) = 2800\text{Hz}$$

- Z obrázku 9 se vypočítá šířka modulace a modulační index  $\beta$ :
- $f_m = 600\text{Hz}, B_v = 3600\text{Hz}, U_m = 2\text{V}$

$$\Delta f = \frac{B_v}{2} - f_m = \frac{3600}{2} - 600 = 1200\text{Hz}$$

$$k_{FM} = \frac{\Delta f}{U_m} = \frac{1200}{2} = 600$$

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{1200}{600} = 2$$

$$B_v = 2f_m \cdot (1 + \beta) = 1200 \cdot (1 + 2) = 3600\text{Hz}$$

Výpočet rezonanční frekvence:

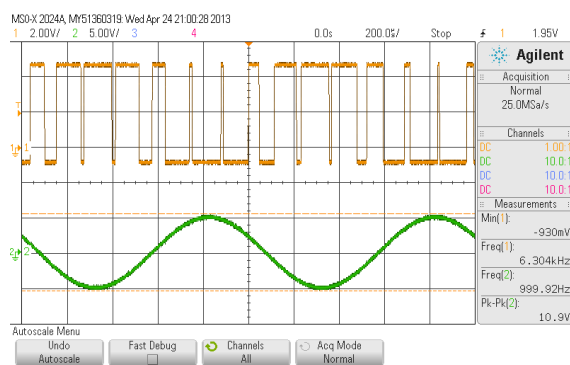
$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{100 \cdot 10^{-9} \cdot 4,7 \cdot 10^{-9}}{100 \cdot 10^{-9} + 4,7 \cdot 10^{-9}} = 4,49 \cdot 10^{-9} F$$

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,047 \cdot 4,49 \cdot 10^{-9}}} = 10957 Hz$$

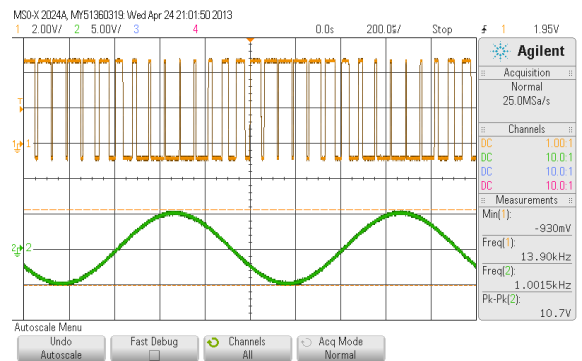
Rezonanční frekvence je 10957Hz.

### 4.3.3 K bodu zadání 3

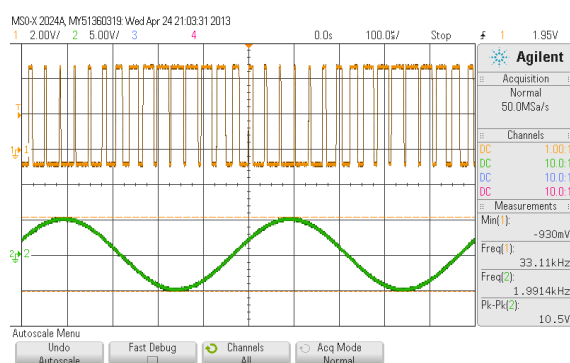
Hodnotu modulačního signálu jsme nastavovali v rozsahu 1 až 2kHz.



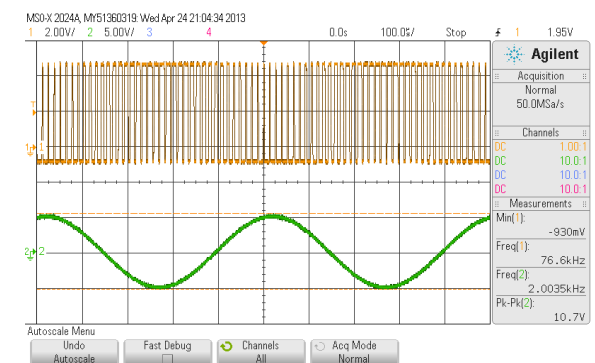
Obr. 10: PWM,  $f_m = 1 \text{ kHz}$ ,  $f_{vz} = 8 \text{ kHz}$ .



Obr. 11: PWM,  $f_m = 1 \text{ kHz}$ ,  $f_{vz} = 16 \text{ kHz}$ .



Obr. 10: PWM,  $f_m = 2 \text{ kHz}$ ,  $f_{vz} = 32 \text{ kHz}$ .



Obr. 11: PWM,  $f_m = 2 \text{ kHz}$ ,  $f_{vz} = 64 \text{ kHz}$ .

## 4.4 Odpovědi na otázky

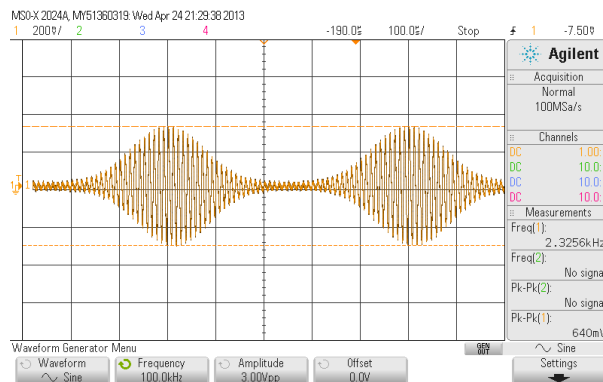
1. Vysvětlete princip AM modulace.  
AM modulace spočívá na principu změny amplitudy nosného signálu v závislosti na amplitudě modulačního signálu. Mění se zde parametr – amplituda nosné se zachováním frekvence nosné.
2. Vysvětlete princip FM modulace.  
FM modulace je založena na principu změny frekvence nosného signálu v závislosti na frekvenci modulačního signálu. Mění se zde parametr – frekvence nosné se zachováním amplitudy nosné.
3. Vysvětlete princip PWM modulace.  
Je to v podstatě komparace svou signálu. Při shodě dvou hodnot amplitudy je na výstupu log. 0 a naopak. Jako nosná se používá trojúhelníkový nebo pilový průběh
4. Je pro praktickou realizaci radiotelekomunikací lepší použít AM nebo FM modulaci?  
Co se týče rádia, vhodnější je FM modulace, při níž nevznikají tak vysoké interference a šířka pásma je daleko využitelnější.
5. Co je to nosná frekvence.  
Nosná frekvence je ta, na kterou se moduluje modulační signál. Má za úkol nést informaci obsaženou v modulačním signálu.
6. Co je to modulační signál.  
Je to signál, ve kterém jsou uloženy užité informace, které chceme, aby byly přeneseny v co nejlepší kvalitě.
7. Co je to modulovaný signál.  
Je to výsledek modulace. Tedy signál s charakterem nosné ovlivněný nějakým parametrem modulačního signálu.
8. Jaký vliv má vzorkovací frekvence na výsledný modulovaný PWM signál.  
Určuje mantinely zaručení kvality modulovaného signálu. V případě, že je vzorkovací frekvence nosné 8kHz, je hranice modulační frekvence 4kHz.

## 4.5 Závěr

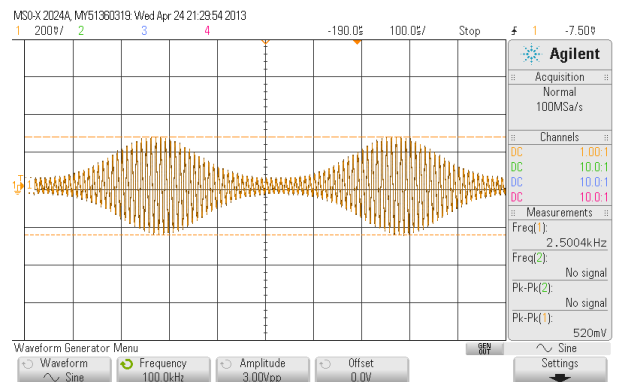
V prvním bodě měření jsme si osvojili základní princip AM modulace a zjistili, jaký vliv má hloubka modulace na výsledný modulovaný signál. V druhém bodě jsme za pomoci spektrálního analyzátoru zjistili, jak se liší šířka modulace v závislosti na rostoucí frekvenci modulačního signálu, dále jsme zjistili, co to znamená index modulace a jak se vypočítá šířka modulace. V posledním bodě laboratorní úlohy jsme si ukázali, jak vypadá PWM modulace a jaký vliv má vzorkovací frekvence.



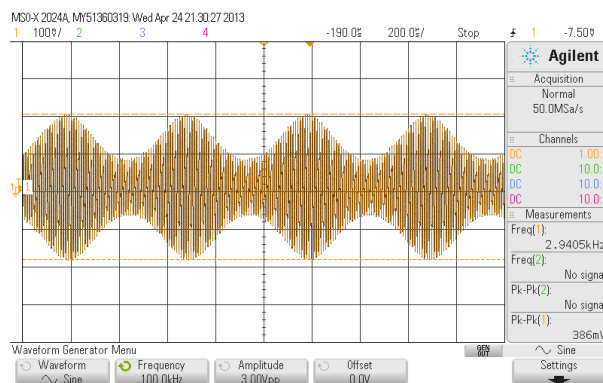
## Příloha 16: Naměřené výsledky AM Modulátoru:



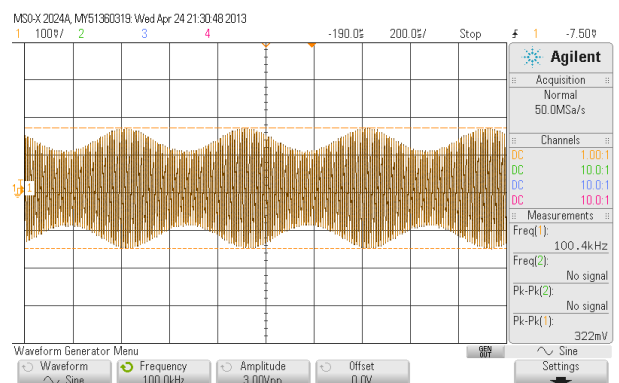
Modulační  $U_M = 2V$ , nosná  $U_C = 3V$ .



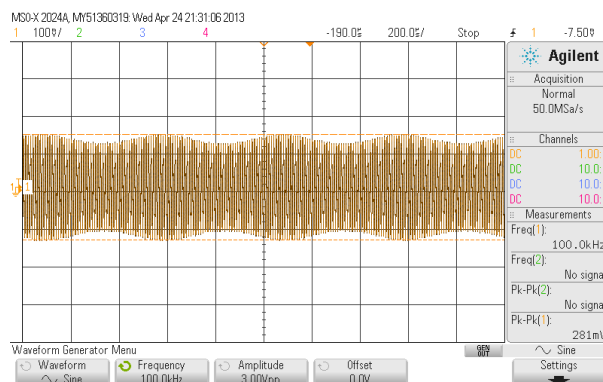
Modulační  $U_M = 1V$ , Nosná  $U_C = 3V$ .



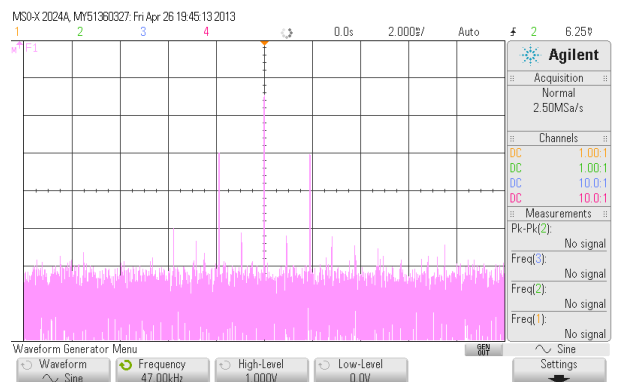
Modulační  $U_M = 500V$ , nosná  $U_C = 3V$ .



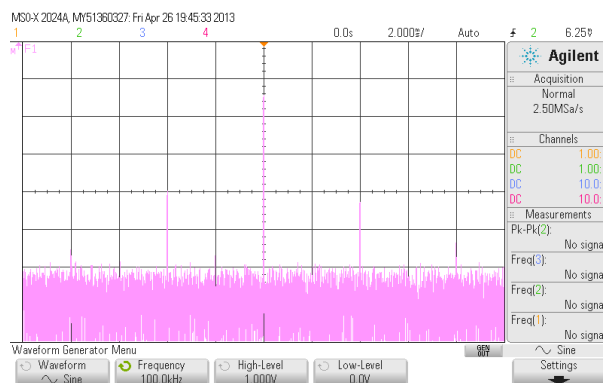
Modulační  $U_M = 250mV$ , Nosná  $U_C = 3V$



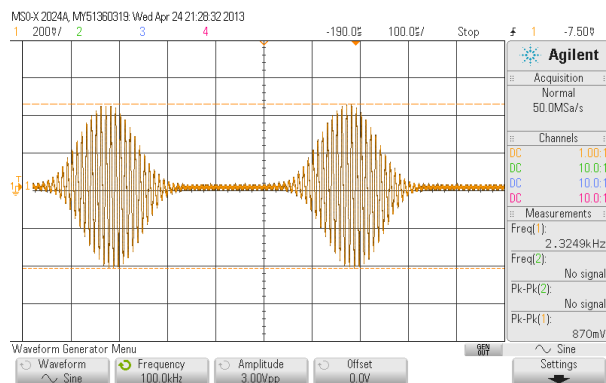
Modulační  $U_M = 100mV$ , nosná  $U_C = 3V$ .



Frekvenční spektrum  $f_c = 100kHz$ .

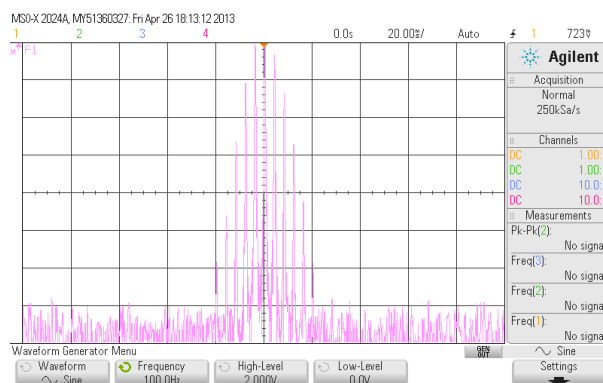


Frekvenční spektrum  $f_c=100\text{kHz}$  .

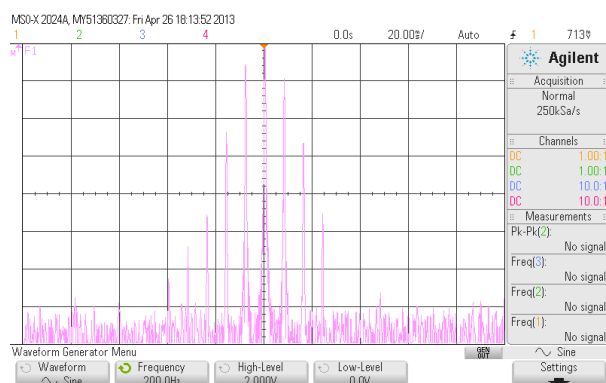


Modulační  $U_M = 3\text{V}$ , nosná  $U_C = 3\text{V}$ .

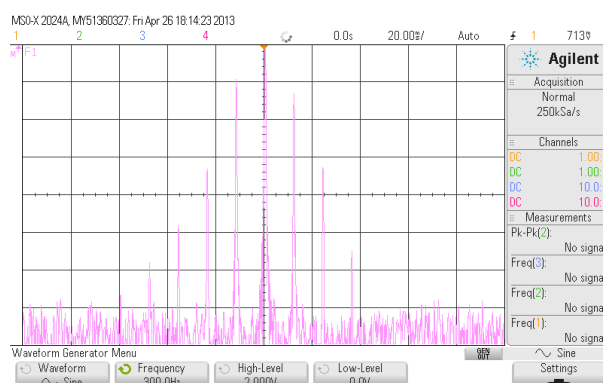
## Příloha 17: Naměřené výsledky FM modulátoru:



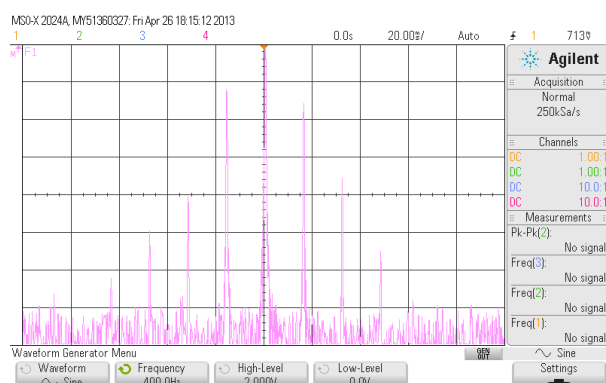
Modulační  $f_m = 100\text{Hz}$ ,  $f_c = 7,3\text{kHz}$ .



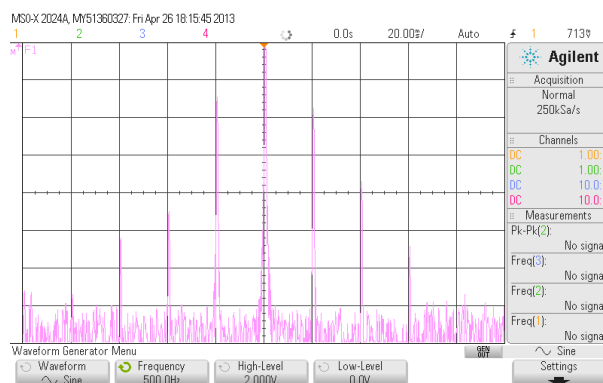
Modulační  $f_m = 200\text{Hz}$ ,  $f_c = 7,3\text{kHz}$ .



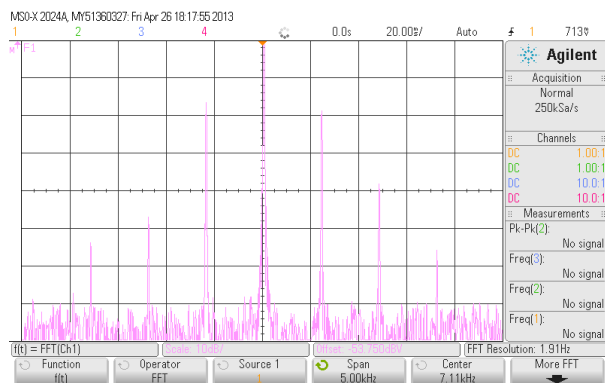
Modulační  $f_m = 300\text{Hz}$ ,  $f_c = 7,3\text{kHz}$ .



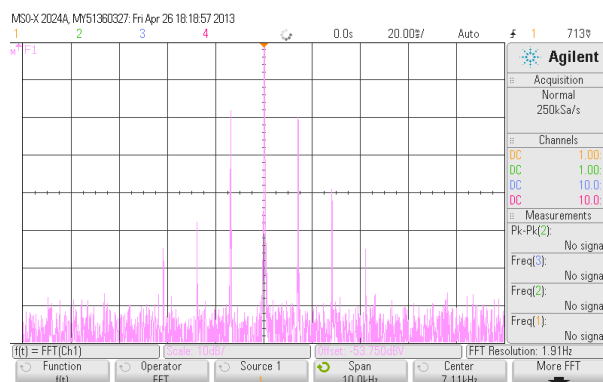
Modulační  $f_m = 400\text{Hz}$ ,  $f_c = 7,3\text{kHz}$ .



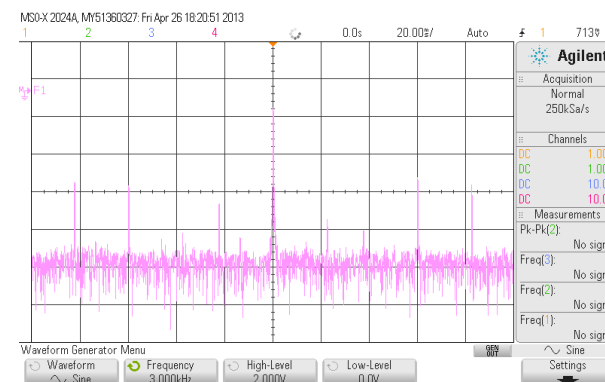
Modulační  $f_m = 500\text{Hz}$ ,  $f_c = 7,3\text{kHz}$ .



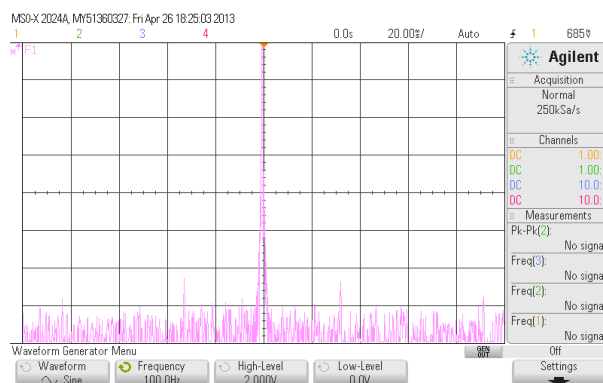
Modulační  $f_m = 600\text{Hz}$ ,  $f_c = 7,3\text{kHz}$ .



Modulační  $f_m = 700\text{Hz}$ ,  $f_c = 7,3\text{kHz}$ .

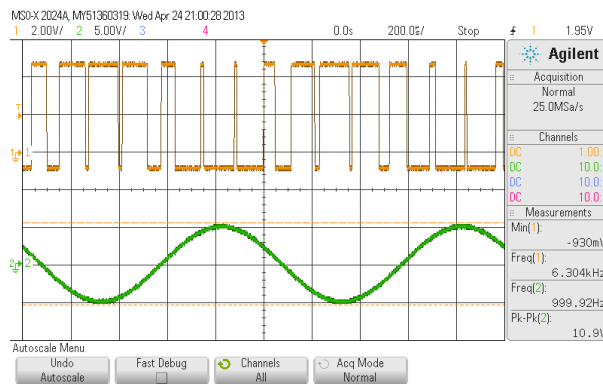


Modulační  $f_m = 1\text{kHz}$ ,  $f_c = 7,3\text{kHz}$ .

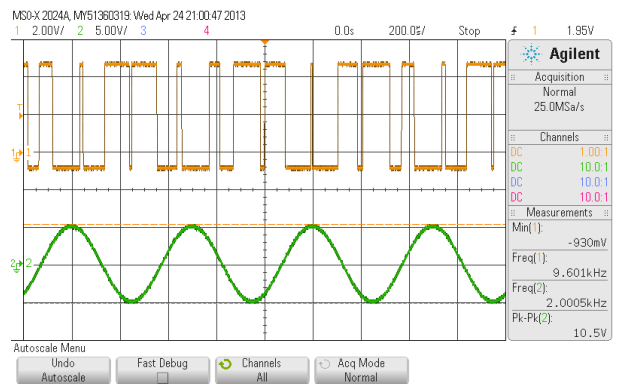


Nosná  $f_c = 7,3\text{kHz}$ .

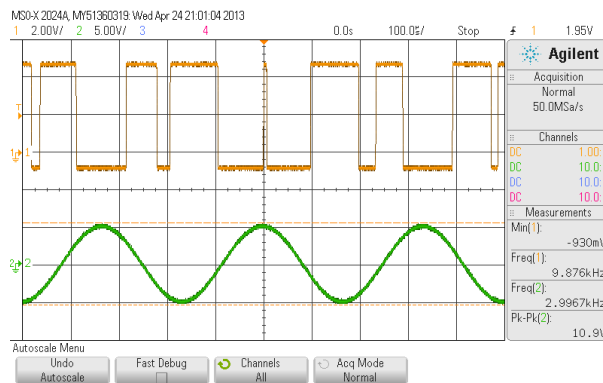
## Příloha 18: Naměřené výsledky PWM modulátoru



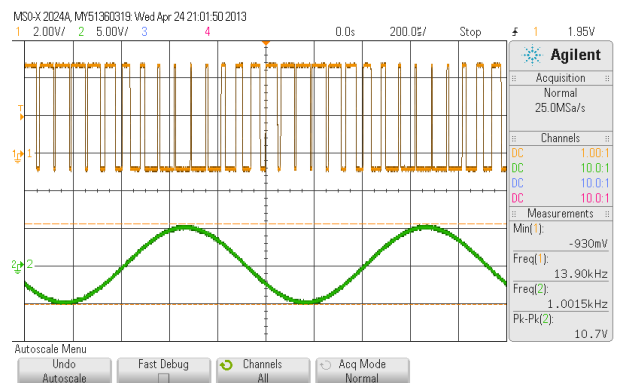
Modulační  $f_m = 1\text{kHz}$ ,  $f_{vz} = 8\text{kHz}$ .



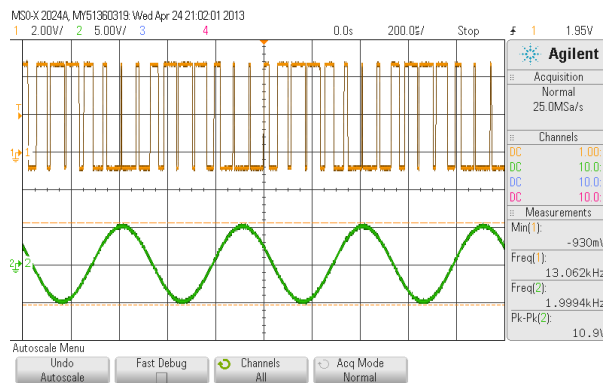
Modulační  $f_m = 2\text{kHz}$ ,  $f_{vz} = 8\text{kHz}$ .



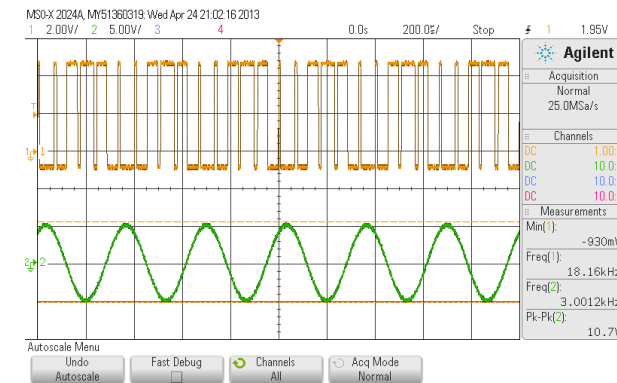
Modulační  $f_m = 3\text{kHz}$ ,  $f_{vz} = 8\text{kHz}$ .



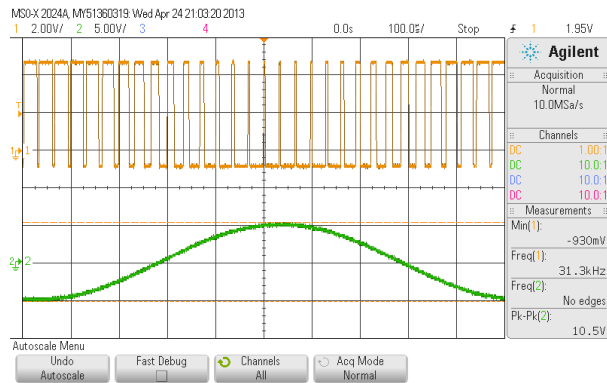
Modulační  $f_m = 1\text{kHz}$ ,  $f_{vz} = 16\text{kHz}$ .



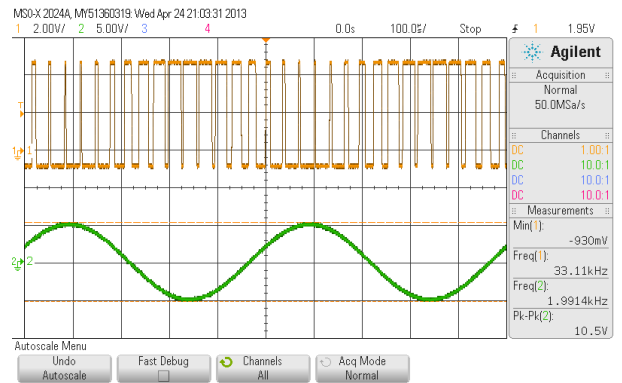
Modulační  $f_m = 2\text{kHz}$ ,  $f_{vz} = 16\text{kHz}$ .



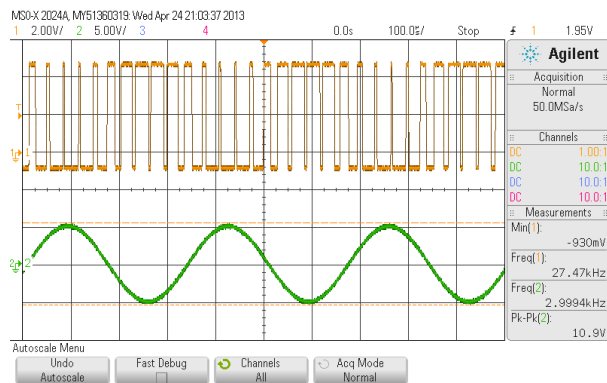
Modulační  $f_m = 3\text{kHz}$ ,  $f_{vz} = 16\text{kHz}$ .



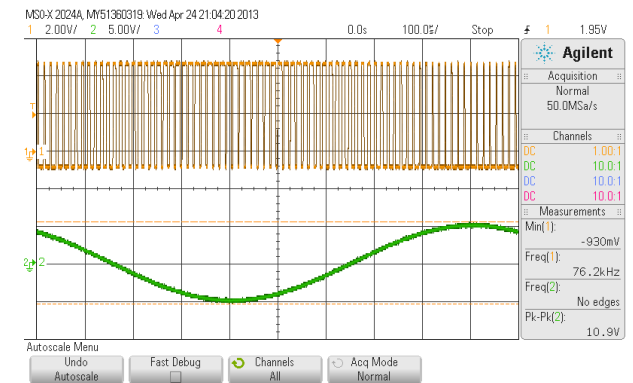
Modulační  $f_m = 1\text{kHz}$ ,  $f_{vZ} = 31\text{kHz}$ .



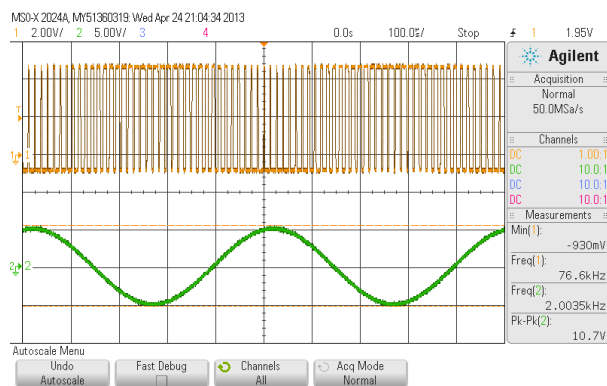
Modulační  $f_m = 2\text{kHz}$ ,  $f_{vZ} = 32\text{kHz}$ .



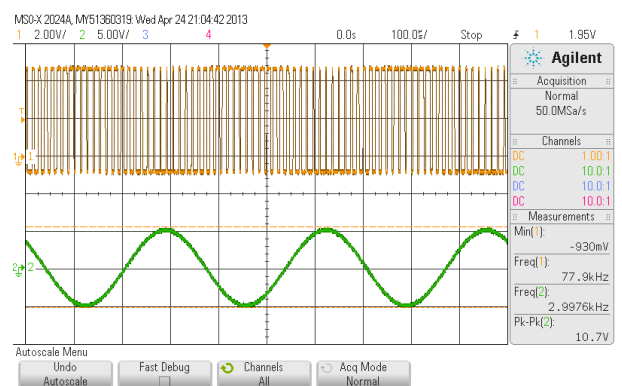
Modulační  $f_m = 3\text{kHz}$ ,  $f_{vZ} = 32\text{kHz}$ .



Modulační  $f_m = 1\text{kHz}$ ,  $f_{vZ} = 64\text{kHz}$ .



Modulační  $f_m = 2\text{kHz}$ ,  $f_{vZ} = 64\text{kHz}$ .



Modulační  $f_m = 3\text{kHz}$ ,  $f_{vZ} = 64\text{kHz}$ .